



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

VÝVOJ KOMPLEXNÍHO SIMULÁTORU SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ A JEHO SPOLUPRÁCE S FV MODULEM

DEVELOPMENT OF THE COMPLEX SIMULATOR OF THE SOLAR IRRADIANCE AND ITS
COOPERATION WITH THE PV MODULE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Roman Petrov

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Ptáček, Ph.D.

BRNO 2018

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Roman Petrov

ID: 146082

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Vývoj komplexního simulátoru slunečního záření a jeho spolupráce s FV modulem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Představení požadavků na simulátor slunečního záření pracujícího jako zdroj vstupních dat pro FV modul v PSCAD
2. Vývoj, zdokonalení a experimentální ověření komplexního simulátoru slunečního záření (např. okamžitá změna slunečního záření, přechod oblačnosti, další funkcionality – vstupní/výstupní hodnoty aj.)
3. Provedení simulací spolupráce komplexního simulátoru slunečního záření s modelem fotovoltaického modulu v PSCAD

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Je vhodné využít technických norem, odborných článků databází IEEE, Web of Science, SCOPUS a jiné. Další literatura je stanovena dle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 21.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Michal Ptáček, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

PETROV, R. *Vývoj komplexního simulátoru slunečního záření a jeho spolupráce s FV modulem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 63 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Ptáček, Ph.D.

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Michalu Ptáčkovi, Ph.D. za odborné rady, ochotu a vstřícnost při zpracování mé práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....

ABSTRAKT

Hlavním bodem této práce je rozšíření komplexního simulátoru slunečního záření, vytvoření nových funkcionalit, a spolupráce tohoto komplexního simulátoru s FV elektrárnou. Tato práce navazuje na rozpracovanou práci v oblasti modelování slunečního záření. Práce se zabývá pokračováním, respektive vylepšováním některých nedostatků, popř. odstraněním nedostatků, jako např. opravení začátků a konců simulace, oprava výpočtu východu a západu slunce, ale také např. přidání různých typů mraků, popř. kombinace různě předvolených situací oblačnosti, nebo zadávání pomocí data, a další. Tyto nedostatky se vyskytují v bakalářské práci „Komplexní simulátor slunečního záření“, a i v této práci je hlavním nástrojem program PSCAD.

Dalším důležitým bodem této práce je realizace simulace, kdy vylepšený simulátor slunečního záření pracuje v spolupráci s modelem fotovoltaického panelu, respektive FV elektrárnou. Ta má různé provozní stavy, které jsou v programu PSCAD vytvořeny. Patří mezi ně např. přechody oblačností, jak nad celou elektrárnou, tak i pouze částečné. Dále jsou zde provedeny experimenty, které dokazují fakt, že směr příchozí oblačnosti hraje roli na výkon FV elektrárny.

KLÍČOVÁ SLOVA: Fotovoltaická elektrárna, empirické rovnice, matematické modelování slunečního záření, PSCAD, intenzita slunečního záření, přechod oblačnosti, výkon FV elektrárny

ABSTRACT

The main point of this thesis is the extension of the complex solar radiation simulator, the creation of new functionalities, and the cooperation of this complex simulator with the PV power plant. This work builds on the work done in the area of solar radiation modeling. The thesis deals with the continuation, or improvement of some shortcomings, removing shortcomings, such as fixing the beginnings and ends of the simulation, correcting the calculation of sunrise and sunset, but also adding different types of clouds, combinations of different preset cloud situations, or data input, and more. These deficiencies are found in the bachelor's thesis "Complex Simulator of the solar irradiance", and PSCAD is the main tool in this work.

Another important point of this work is the realization of the simulation where an improved solar radiation simulator works in cooperation with a model of a photovoltaic panel or a PV power plant, respectively. It has different operating states created in PSCAD. These include, for example, cloud crossings, both over the entire power plant and only partial. In addition, there are experiments that prove the fact that the direction of the incoming cloud plays a role in the power of the PV power plant.

KEY WORDS:

Photovoltaic plant, empirical formulas, mathematical modelling of solar irradiation, PSCAD, intensity of solar radiation, clouds transition, power output of PV plant

OBSAH

OBSAH.....	6
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	8
SEZNAM TABULEK	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
1 ÚVOD	17
2 OPRAVENÍ NEDOSTATKŮ SAMOTNÉHO KOMPLEXNÍHO SIMULÁTORU SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ.....	18
2.1 VYLEPŠOVANÉ PARAMETRY	18
2.1.1 BÍLÝ ŠUM	18
2.1.2 NASTAVENÍ DATA	19
2.1.3 VÝCHOD A ZÁPAD SLUNCE	20
2.1.4 OBLAČNOST	23
3 DALŠÍ MOŽNOST MODELOVÁNÍ DIFÚZNÍHO ZÁŘENÍ.....	28
3.1 HORIZONTÁLNÍ DIFÚZNÍ ZÁŘENÍ NA PLOCHU	28
3.1.1 RAYLEIGHOVO ROZPTYLOVÉ DIFÚZNÍ ZÁŘENÍ	28
3.1.2 AEROSOLY ROZPTÝLENÉ DIFÚZNÍ ZÁŘENÍ.....	31
3.1.3 ŠIROKOPÁSMOVÉ DIFÚZNÍ ZÁŘENÍ	32
3.1.4 PRŮBĚH PRO CELKOVÉ DIFÚZNÍ ZÁŘENÍ A JEHO JEDNOTLIVÉ ČÁSTI	33
4 SROVNÁNÍ MODELŮ DIFÚZNÍCH ZÁŘENÍ	34
4.1 SROVNÁNÍ MODELŮ PŘI STEJNÝCH PODMÍNKÁCH V LETNÍM OBDOBÍ	34
4.2 SROVNÁNÍ MODELŮ PŘI STEJNÝCH PODMÍNKÁCH V ZIMNÍM OBDOBÍ	35
4.3 POROVNÁNÍ PŘÍMÉHO A NOVÉHO DIFÚZNÍHO ZÁŘENÍ.....	35
5 MODEL PŘECHODU OBLAČNOSTI	37
5.1 VÝBĚR OBLAČNOSTI.....	37
5.1.1 MODEL VÝBĚRU OBLAČNOSTI.....	38
5.2 SIMULACE PŘECHODU OBLAČNOSTI.....	39
5.2.1 SMĚR OBLAČNOSTI U POLE 3x3	39
5.2.2 MODEL ČASOVÉHO POSUNU	40
5.3 ČÁSTEČNÉ ZASTÍNĚNÍ	41
5.3.1 ČÁSTEČNÉ ZASTÍNĚNÍ – PŘEDVOLBA	41
5.3.2 ČÁSTEČNÉ ZASTÍNĚNÍ – MANUÁL.....	43
6 FV ELEKTRÁRNA	47
6.1 INTENZITA VSTUPUJÍCÍ DO FV ELEKTRÁRNY.....	47
6.2 TEPLOTA VSTUPUJÍCÍ DO FV PANELU	48

6.3 PARAMETRY FV PANELU	48
6.4 MĚNIČ NAPĚTÍ.....	49
6.4.1 VÝPOČET PARAMETRŮ L A C	50
6.5 PROVEDENÉ EXPERIMENTY	51
6.5.1 EXPERIMENT A	51
6.5.2 EXPERIMENT B	52
6.5.3 EXPERIMENT C	54
6.5.4 EXPERIMENT D	56
6.6 SHRUTÍ PROVEDENÝCH EXPERIMENTŮ	57
7 ZÁVĚR.....	59
POUŽITÁ LITERATURA	61
PŘÍLOHY:	63
7.1 PŘÍLOHA A – CELKOVÉ SCHÉMA MODELU.....	63

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1 Ukázkový průběh slunečního záření z [1]</i>	18
<i>Obr. 2-2 Ukázkový průběh slunečního záření z nového modelu</i>	19
<i>Obr. 2-3 Grafické znázornění prostupu slunečního záření přes mraky [5]</i>	24
<i>Obr. 3-1 Rayleighovo rozptylové záření</i>	31
<i>Obr. 3-2 Průběh rozptylového záření pro aerosoly</i>	32
<i>Obr. 3-3 Průběh záření pro mnohonásobné odrazy</i>	33
<i>Obr. 3-4 Průběh pro celkové difúzní záření a jeho jednotlivé části</i>	33
<i>Obr. 4-1 Průběh pro oba difúzní modely v letním období</i>	34
<i>Obr. 4-2 Průběh pro oba difúzní modely v zimním období</i>	35
<i>Obr. 4-3 Grafické zobrazení poměru nové difúzní složky slunečního záření ku přímému záření</i>	36
<i>Obr. 5-1 Nové uživatelské nastavení pro oblačnost</i>	38
<i>Obr. 5-2 Zobrazení situace pole 3x3 a směru oblačnosti</i>	40
<i>Obr. 5-3 Uživatelské nastavení zastínění pomocí předvolby</i>	41
<i>Obr. 5-4 Konfigurace pro experiment A</i>	41
<i>Obr. 5-5 Částečné zastínění pomocí předvolby - experiment A</i>	42
<i>Obr. 5-6 Konfigurace pro experiment B</i>	42
<i>Obr. 5-7 Částečné zastínění pomocí předvolby - experiment B</i>	43
<i>Obr. 5-8 Uživatelské nastavení zastínění pomocí manuálu</i>	44
<i>Obr. 5-9 Konfigurace pro experiment C</i>	44
<i>Obr. 5-10 Částečné zastínění pomocí manuálního nastavení - experiment C</i>	45
<i>Obr. 5-11 Konfigurace pro experiment D</i>	45
<i>Obr. 5-12 Částečné zastínění pomocí manuálního nastavení - experiment D</i>	46
<i>Obr. 6-1 Uspořádání FV panelů</i>	47
<i>Obr. 6-2 Schéma FV elektrárny s regulací napětí a odběrem</i>	49
<i>Obr. 6-3 Uživatelské rozhraní pro parametrizaci cívky a kondenzátoru měniče a nastavení zátěže</i>	50
<i>Obr. 6-4 Průběh napětí FV elektrárny během experimentu A</i>	51
<i>Obr. 6-5 Průběh proudu FV elektrárny během experimentu A</i>	52
<i>Obr. 6-6 Průběh poměrného výkonu FV elektrárny během experimentu A</i>	52
<i>Obr. 6-7 Průběh napětí FV elektrárny během experimentu B</i>	53
<i>Obr. 6-8 Průběh proudu FV elektrárny během experimentu B</i>	53

<i>Obr. 6-9 Průběh poměrného výkonu FV elektrárny během experimentu B</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 6-10 Průběh napětí FV elektrárny během experimentu C</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 6-11 Průběh proudu FV elektrárny během experimentu C.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 6-12 Průběh poměrného výkonu FV elektrárny během experimentu C.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 6-13 Průběh napětí FV elektrárny během experimentu D.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 6-14 Průběh proudu FV elektrárny během experimentu D</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 6-15 Průběh poměrného výkonu FV elektrárny během experimentu D.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 6-16 Změna napětí při extrémní oblačnosti</i>	<i>58</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2-1 Tabulka s počtem dnů v předcházejícím měsíci.....</i>	<i>20</i>
<i>Tab. 2-2 Určení znaménka souřadnice pro zeměpisnou délku a zeměpisnou šířku [3].....</i>	<i>22</i>
<i>Tab. 2-3 Hodnoty odrazivosti a pohltivosti pro jednotlivé typy oblačnosti</i>	<i>26</i>
<i>Tab. 3-1 Hodnoty tloušťky vodní páry schopné srážek při aktuálních podmínkách [22]</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 3-2 Změna optické tloušťky aerosolu pro vlnové délky 380 nm a 500 nm [23]</i>	<i>31</i>
<i>Tab. 6-1 Uvažovaný poměr přímého a difúzního záření pro různé typy FV panelů</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 6-2 Parametry pro konstantní teplotu FV panelu v různé roční období z [25]</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 6-3 Parametry FV panelu</i>	<i>49</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Veličina	Popis	Jednotka
C	Equation of the centre	-
C	Kapacita měniče	F
C_{LM}	Koeficient pro výskyt oblačnosti	-
D_a	Rozptyl aerosoly	$W \cdot m^{-2}$
$D_{březn}$	Den v březnu pro začátek letního času	-
D_{den}	Den v měsíci	-
D_m	Mnohonásobný odraz záření mezi oblohou a zemí	$W \cdot m^{-2}$
$D_{měsíc}$	Počet dnů předcházejících měsíců	-
$D_{přechod}$	Den navíc při přechodném roce	-
D_r	Rayleighův rozptyl	$W \cdot m^{-2}$
D_{rok}	Den v roce	-
$D_{říjen}$	Den v říjnu pro začátek letního času	-
DST	Posun času pro letní čas	-
DST_{max}	Den v roce, kdy končí letní čas	-
DST_{min}	Den v roce, kdy začíná letní čas	-
f	frekvence spínání	Hz
F_c	Část přímého rozptylu z celkového rozptylu	-
$G_{B\gamma}$	Přímá složka intenzity záření na nakloněnou plochu	$W \cdot m^{-2}$
$G_{B\gamma C}$	Intenzita přímé složky ovlivněná oblačností	$W \cdot m^{-2}$
$G_{B\gamma C2}$	Nová intenzita přímé složky ovlivněná oblačností	$W \cdot m^{-2}$
G_{global}	Celková hodnota dopadajícího slunečního záření vstupující do FV panelu v poli 3x3	$W \cdot m^{-2}$
$G_{skupina,n}$	Intenzita slunečního záření pro n-tou skupinu v poli 3x3	$W \cdot m^{-2}$
H	Hodinový úhel poloviny délky oblohy slunce	°
h_χ	Parametr polohy slunce na obloze	-
C_H	Koeficient pro výskyt oblak typu cirrus	-
I_D	Celkové difúzní záření na plochu	$W \cdot m^{-2}$
Imp	Proud v bodě maximálního výkonu	A
I_{SC}	Sluneční konstanta	$W \cdot m^{-2}$
I_{SC1}	Proud nakrátko celé FV elektrárny	A
I_{SC11}	Proud nakrátko	A
J^*	Sluneční poledne juliánského data	-
J^{**}	Přesnější hodnota slunečního poledne juliánského data	-
J_{den}	Juliánský den	-
$J_{sunrise}$	Východ slunce v juliánském datu	-
J_{sunset}	Západ slunce v juliánském datu	-

$J_{transit}$	Přesná hodnota juliánského data	-
K_{Ac}	Koeficient pro mrak typu altocumulus	-
K_{As}	Koeficient pro mrak typu altostratus	-
K_C	Koeficient pro mrak typu cirrus	-
K_{celk}	Celkový koeficient omezující záření	-
K_{Cf}	Koeficient pro mrak typu cumuliform	-
K_{mrak}	Koeficient pro mrak	-
K_{NH}	Faktor, který zohledňuje výskyt oblak typu cirrus	-
K_{NLM}	Faktor pro oblačnost	-
K_S	Koeficient pro mrak typu stratus	-
K_{SC}	Koeficient pro mrak typu stratocumulus	-
$K_{skupina,n}$	Koeficient n-té skupiny v poli 3x3	-
K_{volba}	Koeficient zvoleného mraku	-
$K_{volba,celkova}$	Celkový koeficient ovlivňující záření	-
K_{volba1}	Koeficient ovlivňující záření pro vrstvu 1	-
K_{volba2}	Koeficient ovlivňující záření pro vrstvu 2	-
K_{volba3}	Koeficient ovlivňující záření pro vrstvu 3	-
K_{volbaA}	Prostupnost zvoleného mraku	-
K_{volbaB}	Odražené záření od zvoleného mraku zpět na Zem	-
L	Indukčnost měniče	H
l_{ao}	Optická tloušťka aerosolu	-
l_{ao380}	Optická tloušťka aerosolu pro 380 nm	-
l_{ao500}	Optická tloušťka aerosolu pro 500 nm	-
l_{oz}	Vertikální tloušťka vrstvy ozonu	cm
M	Měsíc	-
m_a	Hmotnost vzduchu	-
M_j	Střední hodnota sluneční výchyly	-
m_r	Hmotnost vzduchu při tlaku 1013,25 mbar	-
n	Zaokrouhlená hodnota juliánského cyklu	-
N	hodnota výskytu mraku na obloze	desetina
n^*	Juliánský cyklus	-
N_{Ac}	Výskyt mraků typu altocumulus	desetina
N_{As}	Výskyt mraků typu altostratus	desetina
N_{Cf}	Výskyt mraků typu cumuliform	desetina
N_H	Pokrytí oblohy mraky typu cirrus	desetina
N_{LM}	Pokrytí oblohy oblaky	desetina
N_{LMn}	Nové pokrytí oblohy oblaky	desetina
N_{Sc}	Výskyt mraků typu stratocumulus	desetina
N_{St}	Výskyt mraků typu stratus	desetina

N_{volba}	Počet desetin výskytu zvoleného mraku na obloze	-
p	Tlak vzduchu	mbar
P_{mp}	Výkon v bodě maximálního výkonu	W
R	Rok	-
$R_{přechod}$	Pomocná hodnota při přechodném roce	-
T	Teplota vzduchu	K
$T_{východ}$	Čas východu slunce	hod
$T_{západ}$	Čas západu slunce	hod
U_1	Tlakově korelovaná relativní délka optické dráhy vody	cm
U_{11}	Vstupní napětí měniče	V
U_2	Výstupní napětí měniče	V
U_3	Relativní délka optické dráhy ozonu na normální teploty a tlaku	cm
U_{mp}	Napětí v bodě maximálního výkonu	V
U_{oc}	Napětí naprázdno	V
w	Tloušťka vodní páry schopné srážek při 273K a standardním tlaku	cm
w'	Tloušťka vodní páry schopné srážek při aktuálních podmínkách	cm
Z_d	Zeměpisná délka	°
Z_{mrak}	Pomocná proměnná udávající výskyt oblačnosti	-
Z_{δ}	Zeměpisná šířka	°
α	Integrální činitel pohltivosti	-
α_1	Výška slunce	°
α_{mrak}	Pohltivost mraku	-
α_{volba}	Pohltivost zvoleného mraku	-
δ	Deklinace slunce	°
ΔGMT	Posun času časové zóny	-
ΔI_2	Zvlnění výstupního proudu	-
ΔU_2	Zvlnění výstupního napětí	-
θ_z	Úhel zenitu	°
λ	Sluneční ekliptická délka	-
ρ	Integrální činitel odrazu	-
ρ_2	Odražené záření od mraku na zemi	-
ρ_a	Albedo bezoblačné oblohy	-
ρ_{mrak}	Odrazivost mraku	-
$\rho_{země}$	Albedo země	-
τ	Integrální činitel prostupu	-
τ_{aa}	Propustnost přímého záření díky pohltivosti aerosoly	-
τ_{as}	Část celkového dopadajícího záření přeneseného po rozptylu aerosolů	-
τ_g	Rozptylová propustnost plynu	-

τ_{mrak}	Prostupnost mraku	-
τ_o	Rozptylová propustnost ozonu	-
τ_r	Rayleighův rozptylová propustnost	-
τ_w	Rozptylová propustnost vody	-
ω_o	Rozptylující zlomek albeda dopadajícího záření na celkový útlum aerosoly	-

Zkratka	Popis
SEČ	Středoevropský čas
SELČ	Středoevropský letní čas
FV	Fotovoltaická/ý
DST	Z angl. daylight saving time
GMT	Z angl. Greenwich mean time
MPPT	Z angl. maximum power point tracker

Symbol	Popis
Δ	diference

1 ÚVOD

Simulátory slunečního záření jsou navrženy a sestaveny v různých programech jako je např. Matlab, respektive Simulink, PSCAD, a další. V těchto programech jsou simulátory slunečního záření sestaveny s určitými omezeními, popř. danými přednastaveními, jako např. konstantní vstupní intenzita slunečního záření, nebo uvažování ideálního počasí, tzn. žádná oblačnost, což se v praxi téměř nevyskytuje.

Následující práce je systémem rovnic, které na sebe navazují a vytváří tak nový způsob, modelování slunečního záření a jeho spolupráci s FV elektrárnou. To představuje komplexní simulátor slunečního záření. V tomto simulátoru je spousta možností, jak nastavit hodnoty vstupních parametrů, tak, aby nastavená situace co nejlépe odpovídala skutečné situaci, nebo situaci, kterou očekáváme. Výstupem této práce je zjištění, jaké napětí, proud a výkon nám FV elektrárna bude vyrábět pro nastavený den a nastavené podmínky okolí a samozřejmě příchozí oblačnosti. V práci jsou vyhodnocovány průběhy pouze pro Českou republiku.

2 OPRAVENÍ NEDOSTATKŮ SAMOTNÉHO KOMPLEXNÍHO SIMULÁTORU SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ

Tato kapitola se zabývá konkrétními nedostatky, které se nalézají v komplexním simulátoru slunečního záření [1].

2.1 Vylepšované parametry

Následující parametry byly různými způsoby nepřesné, nekorektní, nevhodné, nebo byly přidány jako zcela nové funkcionality.

- Bílý šum
- Nastavení data a letní čas
- Východ a západ slunce
- Přechodný rok
- Oblačnost

V následujících podkapitolách se podrobněji rozebírají jednotlivé problémy.

2.1.1 Bílý šum

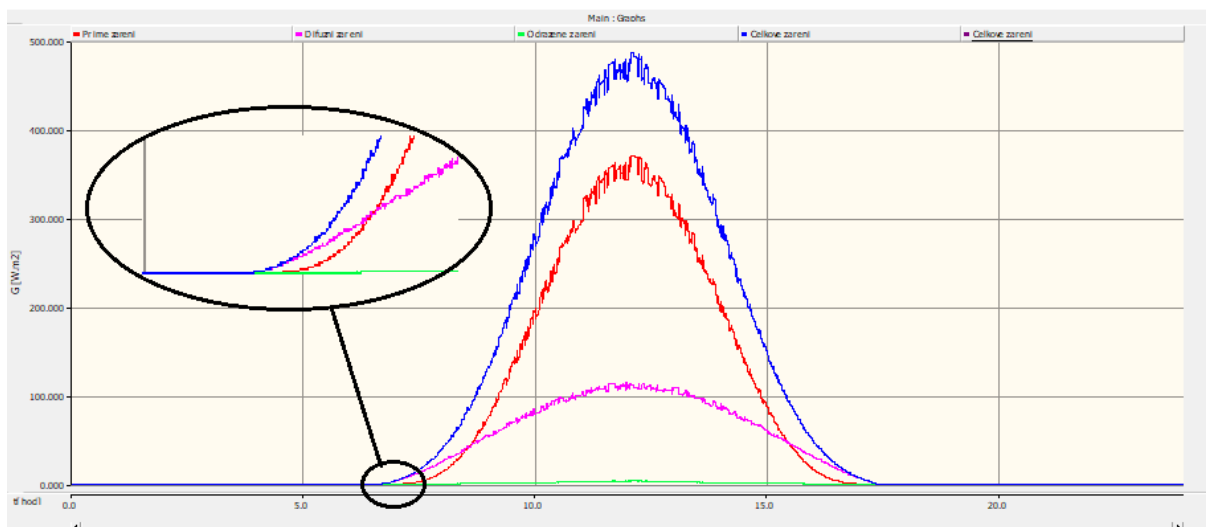
Jak již bylo zmíněno, tak v [1] jsou různé nedostatky. Prvním z nich je umělé vytvoření tzv. bílého šumu. Protože hodnota dopadajícího slunečního záření není ideální a nemá tzv. hladký průběh, je potřeba, aby se namodelovaný průběh blížil co nejvíce skutečnosti, kde hodnota dopadajícího slunečního záření trochu, ale neustále kolísá.

Bílý šum v komplexním simulátoru slunečního záření představuje toto kolísání slunečního záření. V [1] je tento bílý šum vytvořen pomocí bloku „wind source“, který přičítá náhodné číslo k hodnotě slunečního záření. Průběh slunečního záření probíhá od východu do západu slunce, a sluneční záření v jakémkoliv jiném časovém úseku je rovno nule. Následkem toho se v průběhu objevují skokové začátky a konce průběhu, které lze pozorovat na Obr. 2-1.



Obr. 2-1 Ukázkový průběh slunečního záření z [1]

Tento problém byl vyřešen modifikací zkreslení tzv. bílého šumu pomocí již zmíněného bloku „wind source“ a navíc použití bloku „generátor náhodných čísel“. Výsledek nově upraveného bílého šumu lze vidět na Obr. 2-2, kde začátek a konec průběhu slunečního záření již není nijak omezen a nabývá své hodnoty tak, jak by měl.



Obr. 2-2 Ukázkový průběh slunečního záření z nového modelu

2.1.2 Nastavení data

V [1] je jedním z prvních uvedených parametrů nastavení „den v roce“, od kterého se prakticky odvíjí celý výpočet a následně průběh slunečního záření. Bohužel, tento parametr není zcela ideální vstupní hodnotou pro uživatele. Ten si musí buď výpočtem, nebo různými kalendáři zjistit hodnotu, resp. číslo dne v roce, pro který chce průběh vyhodnotit. Toto řešení není moc přívětivé. Proto bylo zadávání hodnoty dne v roce změněno na zadávání pomocí data, ve formátu den, měsíc, rok.

Avšak základní vstupní hodnotou do výpočtu slunečního záření je stále den v roce, proto bylo potřeba ze zadávaného data přepočíst tuto hodnotu na den v roce. Následující rovnice slouží k výpočtu dne v roce ze zadávaného data.

V modelu pro výpočet dnu v roce je použit v programu PSCAD blok, resp. 12 bloků, které jak lze vidět v Tab.2-1, mají přednastavené rozmezí a pro které platí, že jejich výstupem je „hodnota přičítaných dnů“, pokud je vstupní hodnota v tomto rozmezí. Např., pokud je zadán 5 měsíc - květen, počet přičítaných dnů je 120. Podle následující rovnice je určován den v roce:

$$D_{rok} = D_{měsíc} + D_{den} + D_{přechod}, \quad (2.1)$$

kde D_{rok} je den v roce (-), $D_{měsíc}$ je počet dnů v předcházejících měsících, tedy „počet přičítaných dnů“ (-), D_{den} je zadaný den v měsíci (-) a $D_{přechod}$ je započítání dodatečného dne v přechodném roce.

Přechodný rok nastává v případě, že výsledek rovnice (2.2) je celé číslo. Je to zjednodušený předpoklad, který je platný, pokud je zadávaný rok v rozmezí od roku 1990 do roku 2100.

$$R_{přechod} = \frac{R}{4}, \quad (2.2)$$

kde $R_{přechod}$ je přechodný rok (-) a R je zadaný rok (-).

Pokud je $R_{přechod}$ celé číslo, může $D_{přechod}$ nabývat dvou možných hodnot. První je $D_{přechod} = 0$, a to v případě, že zvolené datum je menší než 29. února, což je hodnota $D_{rok} < 59$. Druhou je $D_{přechod} = 1$, který nastává, když je zvolené datum stejné, nebo vyšší než 29. února, tedy $D_{rok} \geq 60$.

Tab. 2-1 Tabulka s počtem dnů v předcházejícím měsíci

měsíc	Rozmezí nastavovaného měsíce	Počet přičítaných dnů
Leden	0 - 1	0
Únor	1,01 - 2	31
Březen	2,01 - 3	59
Duben	3,01 - 4	90
Květen	4,01 - 5	120
Červen	5,01 - 6	151
Červenec	6,01 - 7	181
Srpen	7,01 - 8	212
Září	8,01 - 9	243
Říjen	9,01 - 10	273
Listopad	10,01 - 11	304
Prosinec	11,01 - 12	334

2.1.3 Východ a západ slunce

V [1] je nepřesně určován jeden ze základních parametrů, a tím je výpočet východu a západu slunce. Tento parametr patří k jedněm z nejdůležitějších. Proto byl jeho výpočet opraven novým modelem pro výpočet doby východu a západu slunce, který je uveden níže.

2.1.3.1 Nový model pro výpočet doby východu a západu slunce

Nový a přesnější způsob pro výpočet doby východu a západu slunce je založen na přepočtení data z gregoriánského kalendáře na juliánský, tedy výpočtu juliánského dne.

Vzorec (2.3), který je použit níže je čerpán z [2].

$$J_{den} = \frac{1461 \cdot \left(\frac{M-14}{12} + 4800 + R \right)}{4} + \frac{367 \cdot \left[M - 2 - 12 \cdot \left(\frac{M-14}{12} \right) \right]}{12} - \frac{\left(\frac{\frac{M-14}{12} + 4900 + R}{100} \right) \cdot 3}{4} + D - 32075, \quad (2.3)$$

kde J_{den} je juliánský den (-) a M je zadávaný měsíc (-).

Vypočtený juliánský den dále poslouží k výpočtu východu a západu slunce v juliánském kalendáři. Následující rovnice jsou čerpány ze zdroje [3].

Jak je uvedeno v [3], je zapotřebí nejprve vypočíst juliánský cyklus, který se liší v závislosti od zeměpisné šířky, to je vidět v rovnici (2.4). Rovnice 2.4 až 2.15 jsou použity z [3].

$$n^* = J_{den} - 2451545 - 0,0009 - \frac{Z_d}{360}, \quad (2.4)$$

kde n^* je juliánský cyklus (-) a Z_d je zeměpisná délka ($^\circ$).

Nyní je potřeba hodnotu juliánského cyklu zaokrouhlit, jak lze vidět následující rovnici:

$$n = \text{round}(n^*), \quad (2.5)$$

kde n je zaokrouhlená hodnota juliánského cyklu (-) a round je funkce zaokrouhlování na celá čísla.

K výpočtu skutečného přesného juliánského data je nejprve potřeba vypočíst pár pomocných kalkulací. Nejprve se spočítá přibližná hodnota slunečního poledne podle juliánského data.

$$J^* = 2451545 + 0,0009 + \frac{Z_d}{360} + n, \quad (2.6)$$

kde J^* je přibližná hodnota slunečního poledne juliánského data (-).

Další pomocnou hodnotou je výpočet střední hodnoty sluneční výchylky, která se velice blíží její skutečné hodnotě:

$$M_j = [357,5291 + 0,98560028 \cdot (J^* - 2451545)] \bmod 360, \quad (2.7)$$

kde M_j je střední hodnota sluneční výchylky (-).

Další pomocnou hodnotou je výpočet tzv. "equation of the center":

$$C = [1,9148 \cdot \sin(M_j)] + [0,02 \cdot \sin(2M_j)] + [0,0003 \cdot \sin(3M_j)], \quad (2.8)$$

kde C je hodnota tzv. "equation of the center" (-).

Nyní pomocí hodnoty rovnice středu C a střední hodnoty sluneční výchylky lze spočítat sluneční ekliptickou délku λ :

$$\lambda = (M_j + 102,9372 + C + 180) \bmod 360, \quad (2.9)$$

kde λ je sluneční ekliptická délka (-).

Nyní lze spočítat přesnou hodnotu juliánského data pro sluneční poledne.

$$J_{transit} = J^* + [0,0053 \cdot \sin(M_j)] - [0,0069 \cdot \sin(2\lambda)], \quad (2.10)$$

kde $J_{transit}$ je přesná hodnota juliánského data (-).

Aby bylo možné spočítat hodinový úhel je nejprve nutné zjistit hodnotu deklinace slunce,

$$\delta = \sin^{-1}[\sin(\lambda) \cdot \sin(23,45)], \quad (2.11)$$

kde δ je deklinace slunce ($^\circ$).

Nyní je možné spočítat hodinový úhel, který odpovídá polovině délky oblouku slunce pro zeměpisnou šířku a deklinaci slunce,

$$H = \cos^{-1} \left[\frac{\sin(-0,83) - \sin(Z_s) \cdot \sin(\delta)}{\cos(Z_s) \cdot \cos(\delta)} \right], \quad (2.12)$$

kde H je hodinový úhel poloviny délky oblouku slunce ($^\circ$) a Z_s je zeměpisná šířka ($^\circ$).

Pokud nelze hodnotu H vypočítat, znamená to, že v nastavené zeměpisné šířce nenastává žádný východ, nebo západ slunce.

Nyní je třeba znovu vypočítat hodnotu juliánského data pro sluneční poledne, ale tentokrát se započtením hodnoty hodinového úhlu H :

$$J^{**} = 2451545 + 0,0009 + \frac{H+Z_d}{360} + n, \quad (2.13)$$

kde J^{**} je nová přesnější hodnota juliánského data pro sluneční poledne (-).

Nyní je už možné vypočítat západ slunce v juliánském datu:

$$J_{\text{sunset}} = J^{**} + [0,0053 \cdot \sin(M_j)] - [0,0069 \cdot \sin(2 \cdot \lambda)], \quad (2.14)$$

kde J_{sunset} je západ slunce v juliánském datu (-).

A následně východ slunce, který uvažuje zjednodušení, že sluneční poledne nastává v půlce mezi východem a západem slunce, což je platné pro zeměpisnou šířku $< \pm 60^\circ$, východ slunce se spočítá jako:

$$J_{\text{sunrise}} = J_{\text{transit}} - (J_{\text{sunset}} - J_{\text{transit}}), \quad (2.15)$$

kde J_{sunrise} je východ slunce v Juliánském datu (-).

Nyní je ještě nutné říct, že při zadávání zeměpisné délky se musí rozlišovat, zda je souřadnice pro západní nebo východní délku. A to samé platí pro zeměpisnou šířku, zda je severní nebo jižní šířky. Podle následující tabulky Tab.2 [3] se určí jaké znaménko má zeměpisná šířka a délka.

Tab. 2-2 Určení znaménka souřadnice pro zeměpisnou délku a zeměpisnou šířku [3]

	zeměpisná délka	zeměpisná šířka
západní	+	
východní	-	
severní		+
jižní		-

Nyní je ještě potřeba přepočítat hodnoty juliánského data pro východ a západ slunce do gregoriánského kalendáře, aby byla v poněkud čitelnější formě.

2.1.3.2 Model automatického výpočtu pro letní čas

Jak je uvedeno v [18] na letní čas se v Česku každý rok přechází poslední neděli v březnu, kdy po 01:59:59 SEČ (středoevropského času) následuje 03:00:00 SELČ (středoevropského letního času) a letní čas končí poslední neděli v říjnu, kdy se po 02:59:59 SELČ hodiny posunou na 02:00:00 SEČ.

Ještě, než se začne s přepočtem z juliánského na gregoriánský je potřeba určit, jestli je či není letní čas. V [1] byl jedním ze vstupních parametrů, které musí uživatel nastavit, právě tento letní čas. Vzhledem k tomu, že by bylo pro uživatele jednodušší, kdyby nemusel

zjišťovat a následně nastavovat, zda je či není letní čas, je součástí jednoho z vylepšení to, že je rozmezí letního času automaticky vypočteno. V případě, že je letní čas, se připočte jistá hodnota. Následující rovnice a popis slouží ke zjištění letního času z nastaveného data.

Nejprve je nutné zjistit v jaký den v měsíci březnu letní čas začíná, a podle [12] se tento den vypočítá následovně:

$$D_{březen} = 31 - \left\lfloor \left\{ \left(\frac{5 \cdot R}{4} + 4 \right) - \left[\left(\frac{5 \cdot R}{4} + 4 \right) \bmod 1 \right] \right\} \bmod 7 \right\rfloor, \quad (2.16)$$

kde $D_{březen}$ je den v březnu kdy začíná letní čas (-).

Následně den v měsíci říjnu, kdy letní čas končí, také podle [12]:

$$D_{říjen} = 31 - \left\lfloor \left\{ \left(\frac{5 \cdot R}{4} + 1 \right) - \left[\left(\frac{5 \cdot R}{4} + 4 \right) \bmod 1 \right] \right\} \bmod 7 \right\rfloor, \quad (2.17)$$

kde $D_{říjen}$ je den v říjnu kdy končí letní čas (-).

Nyní je potřeba zjistit rozmezí pro den v roce, kdy je platný letní čas, k tomu slouží následující dvě rovnice,

$$DST_{min} = 59 + D_{březen} + D_{přechod}, \quad (2.18)$$

kde DST_{min} je den v roce, kdy začíná letní čas (-).

$$DST_{max} = 272 + D_{říjen} + D_{přechod}, \quad (2.19)$$

kde DST_{max} je den v roce, kdy končí letní čas (-).

Také je potřeba vyhodnotit kdy letní čas nastává:

$$DST_{min} < D_{den} < DST_{max}, \quad (2.20)$$

Pokud je nastavený den v tomto rozmezí, znamená to, že je letní čas a hodnota $DST = 1$, pokud letní čas není, je hodnota $DST = 0$.

2.1.3.3 Model pro přepočtení východu a západu slunce z juliánského do gregoriánského data

Pro přepočet data z juliánského na gregoriánský pro východ slunce slouží následující rovnice,

$$T_{východ} = DST + \Delta GMT + \{ [24 \cdot (J_{východ} \bmod 1)] - 12 \}, \quad (2.21)$$

kde $T_{východ}$ je východ slunce (hod), DST je posun času pro letní čas (-) ΔGMT je posun časové zóny od centrálního Greenwichského času“ (-).

Pro přepočet data z juliánského na gregoriánský pro západ slunce slouží tato rovnice,

$$T_{západ} = DST + \Delta GMT + \{ [(J_{východ} \bmod 1) + 1] \cdot 24 \} - 12 \}, \quad (2.22)$$

kde $T_{západ}$ je východ slunce (hod).

2.1.4 Oblačnost

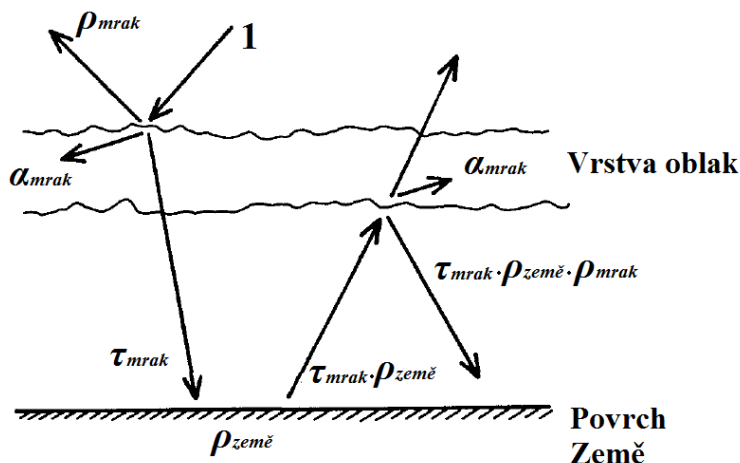
Dalším prvkem, který byl upraven, respektive rozšířen je model oblačnosti. Ten byl rozšířen o nové typy oblak. A to jsou mraky typu altocumulus, stratocumulus, stratus, altostratus a cumuliform.

V [4] je řečeno: “Světelně technické vlastnosti látek charakterizují tři činitele odpovídající zmíněnému rozdělení světelného toku. Jsou to integrální činitel odrazu ρ , integrální činitel prostupu τ a integrální činitel pohlcení α ”, a že pro tyto činitele platí:

$$\rho + \tau + \alpha = 1, \quad (2.23)$$

kde ρ je integrální činitel odrazu (-), τ je integrální činitel prostupu (-) a α je integrální činitel pohlcení (-).

Stejnou informaci uvádí i zdroj [5], kde je zároveň uvedeno grafické zobrazení prostupu záření přes mraky, jak lze vidět na Obr.2-3.



Obr. 2-3 Grafické znázornění prostupu slunečního záření přes mraky [5]

V [5] jsou uvedeny rovnice pro prostup záření přes oblaka. Tyto rovnice byly mírně modifikovány tak, aby do nich byl zahrnut parametr množství mraku zadávaný v desetínách. Obecně pro jakýkoliv typ mraku lze proto říct, že:

$$\tau_{mrak} = 1 - \rho_{mrak} - \alpha_{mrak}, \quad (2.24)$$

kde τ_{mrak} je prostupnost mraku (-), ρ_{mrak} je odrazivost mraku (-) a α_{mrak} je pohltivost mraku (-).

Dále ještě připočtení odraženého záření od mraků zpět na Zem platí:

$$\rho_2 = \tau_{mrak} \cdot \rho_{země} \cdot \rho_{mrak}, \quad (2.25)$$

kde ρ_2 je odražené záření od mraku na Zem (-) a $\rho_{země}$ je albedo zemského povrchu (-).

Obecná rovnice pro výpočet koeficientu mraku je potom:

$$K_{mrak} = 1 - (1 - \tau_{mrak} - \rho_2) \cdot \frac{N}{10}, \quad (2.26)$$

kde K_{mrak} je koeficient daného mraku (-) a $\frac{N}{10}$ je počet desetín výskytu daného mraku na obloze (-).

Z této rovnice lze vyjádřit šest individuálních koeficientů pro jednotlivé typy oblačnosti. K_C je koeficient pro mraky typu cirrus (-), K_{Ac} je koeficient pro mraky typu altocumulus (-), K_{Sc} je koeficient pro mraky typu stratocumulus (-), K_S je koeficient pro mraky typu stratus (-), K_{As} je koeficient pro mraky typu altostratus (-) a K_{Cf} je koeficient pro mraky typu cumuliform (-).

Podle následující rovnice pak vzniká celkový koeficient omezující záření:

$$K_{celk} = K_C \cdot K_{Ac} \cdot K_{SC} \cdot K_S \cdot K_{As} \cdot K_{cf}, \quad (2.27)$$

kde K_{celk} je celkový koeficient omezující záření (-).

2.1.4.1 Oblaka typu Stratus

Stratus, je oblak, který se v podstatě neliší od mlhy. Vyskytuje se v nejnižších výškách, často jen několik metrů nad zemí. Vzniká nejčastěji z mlhy, jejíž spodní hranice se zvedá od zemského povrchu do větší výšky. V pozdním létě, kdy se noční inverze a s nimi spojená oblačnost stratus v dopoledních hodinách rozpouští, mohou přecházet tyto oblaky do tvarů stratocumulus až cumulus. Podle [6].

2.1.4.2 Oblaka typu Cumuliform - Cumulus

Základna aktivního cumulu je plochá, a protože na základnu nahlížíme zdola, zatímco oblak je nasvícen shora a je pro světlo málo průsvitný, jeví se jeho základna jako tmavá. Z toho též plyne, že cumuly vrhají na zemi stíny. Pro aktivní cumulus je dále charakteristická ostře ohraničená vrchní část, a ta se naopak obvykle jeví jako jasně bílá. Pokud vzestupný proud pod oblakem skončí, oblak přestane být dále zásobován vlhkostí a začne se rozpadat a ztrácet jasné kontury. Podle [10].

2.1.4.3 Oblaka typu Altostratus

Altostratus je frontální oblak, jehož horizontální rozměry jsou stovky až tisíce kilometrů a vertikální rozměry v rádech stovek metrů. Tento oblak je definován jako šedavá či namodralá oblačná plocha nebo vrstva se strukturou vláknitou nebo žebrovitou, případně bez patrné struktury, pokrývající úplně nebo částečně oblohu. Je tak tenká, že místy jsou alespoň částečně patrné obrysy slunce, které se jeví jako za matným sklem. S altostratem nejsou spojeny halové jevy^[1]. altostratus je tmavší než Cirrostratus, ale světlejší než Nimbostratus. Jedná se o oblak středního patra, tzn. obvykle se nachází ve výškách 2-6 km. Může postupně mohutnět a měnit se v druh nimbostratus. Altostratus mívá většinou nezřetelnou strukturu, vypadá jako jednolitá šedavá plocha. Podle [8].

2.1.4.4 Stratocumulus

Stratocumulus je oblak, nesoucí známky vertikálního vývoje. Řadíme jej k oblakům nízkého patra. Vyskytuje se ve výškách od několika desítek nebo stovek metrů nad zemí až do výšky kolem dvou kilometrů. Má podobu kupovitých valounů nebo peřin, často šedé barvy. Někdy může zatahovat celou oblohu a můžou z něho vypadávat srážky. Stratocumulus vzniká rozpadem jiného druhu oblaku díky turbulentnímu proudění – nejčastěji z typu cumulus. Je složený většinou z vodních kapiček, někdy s příměsí ledových krystalků. Podle [7].

2.1.4.5 Altocumulus

Altocumulus jsou menší či větší oblaky bílé až šedé barvy, popřípadě obojí. Skládají se z částecek ve tvaru vln, oblázků nebo valounů, které jsou navzájem oddělené, ale mohou i souviset. Vyskytují se uspořádané do řad, někdy i ve více vrstvách; tyto části od sebe bývají

odděleny ostře ohraničenými bezoblačnými pásy. Mívají vláknitý či rozplývavý vzhled, ale jejich obrysy jsou ostře ohraničeny. Zřídka mohou připomínat síť nebo včelí plást, pokud se v jejich ploše vyskytují malé okrouhlé mezery s řasnatými okraji. Tvoří je drobné kapičky vody, avšak při velmi nízkých teplotách mohou vznikat ledové krystaly. Altocumuly se vytváří v oblasti středního patra (1,5 – 7 km) při okraji rozsáhlé vystupující vzduchové vrstvy. Může vzniknout z cumulu, když přestane být zásobován vlhkostí. Skládají se buď z malých, zahuštěných částí, nebo jsou celistvým, hladkým oblakem. Mají vlastní stín. Měsíc i Slunce pouze prosvítají; jejich kotouč je neohraničený, kolem se vytváří malý kruh. Podle [9].

Číselné hodnoty pro jednotlivé typy mraků

Pro tyto nové typy oblačnosti a pro oblaka typu cirrus platí hodnoty z následující tabulky. Hodnoty odrazivosti pro jednotlivé typy mraků byly určeny jako aritmetický průměr ze zdrojů [13], [14], [15] a [17], které uvádějí jejich hodnoty. Hodnota pohltivosti pro oblaka je pro zjednodušení pro všechny stejná, a její velikost je určena z [16], kde je více rozebrána pro jednotlivé typy oblačnosti.

V Tab. 2-3 lze vidět jednotlivé hodnoty odrazivosti, respektive albeda pro jednotlivé typy oblaků a hodnotu pohltivosti pro jednotlivé typy oblaků.

Tab. 2-3 Hodnoty odrazivosti a pohltivosti pro jednotlivé typy oblačnosti

Typ mraku	ρ_{mrak}	α_{mrak}
Cirrus	0,42	0,17
Alto cumulus	0,66	0,17
Strato cumulus	0,62	0,17
Stratus	0,44	0,17
Alto stratus	0,55	0,17
Cumuliform	0,7	0,17

2.1.4.6 Nově upravené modely

V [1] je uvedena rovnice pro výpočet přímé složky slunečního záření jako:

$$G_{B\gamma C} = G_{B\gamma} \cdot \sin h_{\chi} \cdot C_H \cdot C_{LM}, \quad (2.28)$$

kde $G_{B\gamma C}$ je celková složka přímého záření na nakloněnou plochu ($W \cdot m^2$), $G_{B\gamma}$ je špičková hodnota přímé složky na nakloněnou plochu ($W \cdot m^2$) h_{χ} je parametr polohy slunce na obloze (-), C_H je koeficient určující množství výskytu mraků typu cirrus (-) a C_{LM} je koeficient určující množství výskytu mraků vyskytujících se ve středních až nízkých polohách (-).

Nový upravený model pro výpočet přímé složky slunečního záření je:

$$G_{B\gamma C2} = G_{B\gamma} \cdot \sin h_{\chi} \cdot K_{celk}, \quad (2.29)$$

kde $G_{B\gamma C2}$ je nová celková složka přímého záření na nakloněnou plochu ($W \cdot m^2$) a K_{celk} je celkový koeficient omezující záření (-).

Dalším upraveným parametrem je parametr K_{NLM} , který je, jak uvádí [1] následný:

$$K_{NLM} = 0,89 + 0,11 \cdot 10^{0,17 \cdot N_{LM}}, \quad (2.30)$$

kde K_{NLM} je koeficient faktoru pro nízkou a střední výšku oblačnosti (-) a N_{LM} je výskyt mraků střední a nízké výšky v desetinách (-).

Nově upravený parametr nyní počítá s různými typy mraků, a proto je nahrazen parametr N_{LM} za následující:

$$N_{LMn} = N_{St} + N_{Sc} + N_{As} + N_{Ac} + N_{Cf}, \quad (2.31)$$

kde N_{LMn} je nový parametr pro výskyt mraků střední a nízké výšky v desetinách (-), N_{St} je výskyt mraků typu stratus v desetinách (-), N_{Sc} je výskyt mraků typu stratocumulus v desetinách (-), N_{As} je výskyt mraků typu altostratus v desetinách (-), N_{Ac} je výskyt mraků typu altocumulus v desetinách (-) a N_{Cf} je výskyt mraků typu cumuliiform v desetinách (-). Nový koeficient faktoru pro oblačnost nízkých a středně vysokých mraků je:

$$K_{NLMn} = 0,89 + 0,11 \cdot 10^{0,17 \cdot N_{LMn}}, \quad (2.32)$$

kde K_{NLMn} je nový koeficient pro oblačnost nízké a středně vysoké oblačnosti (-).

3 DALŠÍ MOŽNOST MODELOVÁNÍ DIFÚZNÍHO ZÁŘENÍ

Tato kapitola se podrobně zabývá dalším způsobem modelování difúzního záření. Všechny informace v této kapitole jsou čerpány zejména ze [19], další vybrané pak z [20], [21], [22], [23] a [24].

3.1 Horizontální difúzní záření na plochu

Podle [19] je horizontální záření na plochu dáno kombinací tří individuálních součástí. První z nich je Rayleighovo rozptýlení po prvním průchodu záření přes atmosféru, dále rozptýlení aerosoly po prvním průchodu záření atmosférou a posledním členem je tzv. několikanásobný proces odrazu mezi zemí a oblohou:

$$I_D = D_r + D_a + D_m, \quad (3.1)$$

kde I_D je celkové difúzní záření na plochu ($\text{W}\cdot\text{m}^2$), D_r je Rayleighův rozptyl ($\text{W}\cdot\text{m}^2$), D_a je rozptyl přes aerosoly ($\text{W}\cdot\text{m}^2$) a D_m je mnohonásobný odraz záření mezi zemí a oblohou ($\text{W}\cdot\text{m}^2$).

3.1.1 Rayleighovo rozptylové difúzní záření

Rayleighovo rozptylové difúzní záření po prvním průchodu atmosférou je dáno následující rovnicí:

$$D_r = \frac{0,79 \cdot \sin \alpha_1 \cdot I_{SC} \cdot \tau_o \cdot \tau_g \cdot \tau_w \cdot \tau_{aa} \cdot 0,5 \cdot (1 - \tau_r)}{1 - m_a + m_a^{1,02}}, \quad (3.2)$$

kde α_1 je tzv. výška slunce, která značí úhel mezi sluncem a horizontem Země ($^\circ$), I_{SC} je Sluneční konstanta ($\text{W}\cdot\text{m}^2$), τ_o je rozptylová propustnost pro ozon (-), τ_g je rozptylová propustnost pro plyn (-), τ_w je rozptylová propustnost pro vodu (-), τ_{aa} je propustnost přímého záření způsobená pohltivostí aerosolu (-), τ_r je Rayleighova rozptylová propustnost (-) a m_a je relativní objem vzduchu nad zemí (-).

Hodnota $\sin \alpha_1$, která značí výšku slunce je vztažena k úhlu zenitu následujícím vztahem:

$$\sin \alpha_1 = \cos \theta_z, \quad (3.3)$$

kde θ_z je úhel zenitu ($^\circ$).

Hodnota sluneční konstanty je rovna $1367 \text{ W}\cdot\text{m}^2$.

Velikost cosinu úhlu zenitu, který je roven sinu úhlu výšky slunce je určena podle [24] touto rovnicí:

$$\cos \theta_z = \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \tau, \quad (3.4)$$

kde δ je deklinace slunce ($^\circ$), φ je zeměpisná šířka ($^\circ$) a τ je hodinový úhel slunce ($^\circ$).

Hodnota deklinace δ a hodinového úhlu τ je určena z [1].

3.1.1.1 Rozptylová propustnost pro Ozon

Rozptylová propustnost se určí podle vztahu:

$$\tau_o = 1 - [0,1611 \cdot U_3 \cdot (1 + 139,48 \cdot U_3)^{-0,3035} - 0,002715 \cdot U_3 \cdot (1 + 0,044 \cdot U_3 + 0,0003 \cdot U_3^2)^{-1}], \quad (3.4)$$

kde U_3 je relativní délka optické dráhy ozonu za normální teploty a povrchového tlaku (cm).

Tato relativní délka optické dráhy ozonu se určí jako:

$$U_3 = l_{oz} \cdot m_r, \quad (3.5)$$

kde l_{oz} je vertikální tloušťka vrstvy ozonu (cm) a m_r je hmotnost vzduchu při standardním tlaku 1013,25 mbar (-).

Průměrná hodnota tloušťky vrstvy ozonu l_{oz} je podle [20] po celém zemském povrchu přibližně 300 Dobsonových jednotek, což odpovídá tloušťce 3 mm, tedy 0,3 cm. Hmotnost vzduchu při standardním tlaku m_r se určí podle [21] jako:

$$m_r = \frac{1}{\cos \theta_z}, \quad (3.6)$$

3.1.1.2 Rozptylová propustnost pro plyn

Rozptylová propustnost pro plyn je určena následující rovnicí:

$$\tau_g = e^{-0,0127 \cdot m_a^{0,26}}, \quad (3.7)$$

3.1.1.3 Rozptylová propustnost pro vodu

Rozptylová propustnost pro vodu je dána:

$$\tau_w = 1 - 2,4959 \cdot U_1 \cdot [(1 + 79,034 \cdot U_1)^{0,6828} + 6,385 \cdot U_1]^{-1}, \quad (3.8)$$

kde U_1 je tlakově korelovaná relativní délka optické dráhy vody schopné srážek (cm).

Tlakově korelovaná relativní délka optické dráhy vody schopné srážek je dána tímto vztahem:

$$U_1 = w \cdot m_r, \quad (3.9)$$

kde w je tloušťka vodní páry schopné srážek, redukována na standardní tlak při teplotě 273 K (cm).

Tloušťka vodní páry schopné srážek redukována na standardní tlak při teplotě 273 K je dána:

$$w = w' \cdot \left(\frac{p}{1013,25} \right)^{0,75} \cdot \left(\frac{273}{T} \right)^{0,5}, \quad (3.10)$$

kde w' je tloušťka vodní páry schopné srážek při aktuálních podmínkách (cm), p je aktuální tlak (mbar) a T je aktuální teplota (K).

Hodnota w' se mění v závislosti na roční době a přibližně odpovídá následující tabulce z [22]:

Tab. 3-1 Hodnoty tloušťky vodní páry schopné srážek při aktuálních podmínkách [22]

měsíc	w' [cm]
Leden	0,5
Únor	0,75
Březen	1
Duben	1
Květen	1,5
Červen	2
Červenec	2,3
Srpen	2,7
Září	1,8
Říjen	1,2
Listopad	0,8
Prosinec	0,3

3.1.1.4 Propustnost přímého záření aerosoly

Propustnost přímého záření aerosoly díky jejich pohltivosti se určí z této rovnice:

$$\tau_{aa} = 1 - (1 - \omega_o) \cdot (1 - m_a + m_a^{1,06}) \cdot (1 - \tau_a), \quad (3.11)$$

kde ω_o je jednotlivý rozptylující zlomek albeda dopadajícího záření rozptýleného na celkový útlum aerosoly (-) a τ_a je rozptylová propustnost aerosolů (-). Hodnota ω_o se uvažuje 0,9.

3.1.1.5 Rozptylová propustnost aerosoly

Rozptylová propustnost aerosoly je dána:

$$\tau_a = e^{-l_{ao}^{0,873} \cdot (1 + l_{ao} - l_{ao}^{0,7808}) \cdot m_a^{0,9108}}, \quad (3.12)$$

kde l_{ao} je optická tloušťka aerosolu (-).

Optická tloušťka aerosolu je dána:

$$l_{ao} = 0,2758 \cdot l_{ao380} + 0,35 \cdot l_{ao500}, \quad (3.13)$$

kde l_{ao380} je optická tloušťka aerosolu pro vlnovou délku 380 nm (-) a l_{ao500} je optická tloušťka aerosolu pro vlnovou délku 500 nm (-).

Podle zdroje [23] je uvedeno, že hodnota l_{ao500} se mění při různém ročním období. V následující tabulce lze vidět přibližně jak.

Tab. 3-2 Změna optické tloušťky aerosolu pro vlnové délky 380 nm a 500 nm [23]

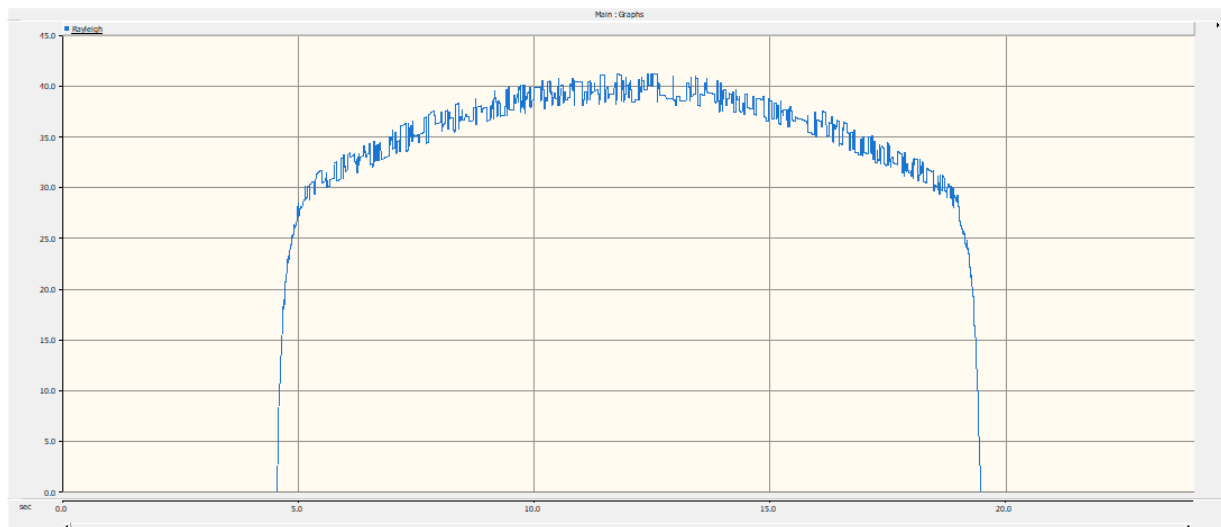
měsíc	$\lambda=380$ nm	$\lambda=500$ nm
Leden	0,11	0,09
Únor	0,2	0,15
Březen	0,23	0,17
Duben	0,32	0,22
Květen	0,28	0,2
Červen	0,23	0,17
Červenec	0,33	0,23
Srpen	0,42	0,31
Září	0,34	0,25
Říjen	0,19	0,14
Listopad	0,15	0,12
Prosinec	0,11	0,09

3.1.1.6 Rayleighova rozptylová propustnost

Rayleighova rozptylová propustnost je dána touto rovnicí:

$$\tau_r = e^{-0,0903 \cdot m_a^{0,84} \cdot (1 + m_a - m_a^{1,01})}, \quad (3.14)$$

3.1.1.7 Průběh pro Rayleighovo rozptylové záření



Obr. 3-1 Rayleighovo rozptylové záření

3.1.2 Aerosoly rozptýlené difúzní záření

Aerosoly rozptýlené difúzní záření po prvním průchodu atmosférou je dáno touto rovnicí:

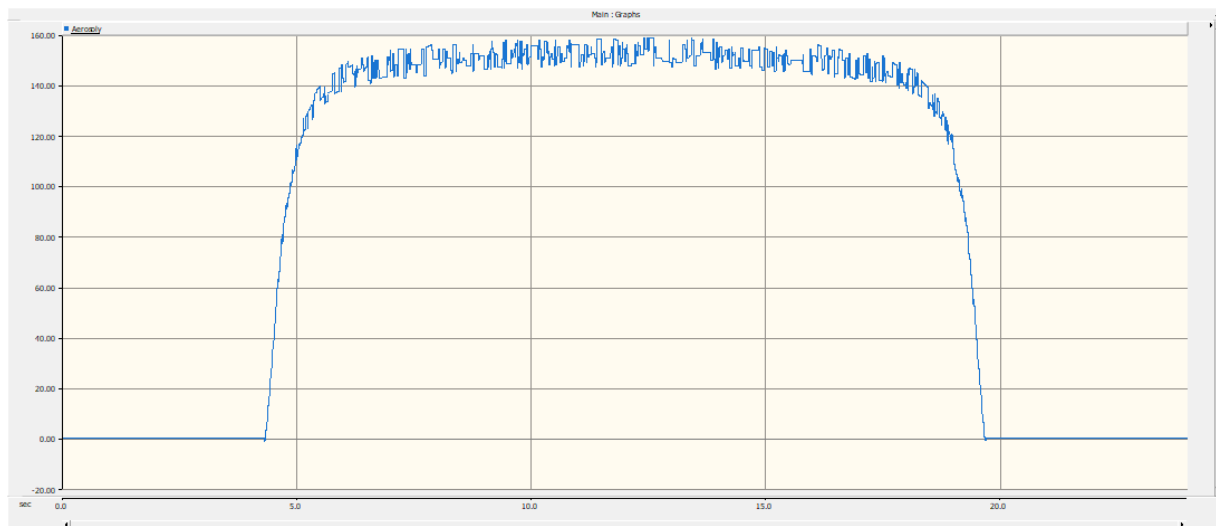
$$D_a = \frac{0,79 \cdot \sin \alpha_1 \cdot I_{SC} \cdot \tau_o \cdot \tau_g \cdot \tau_w \cdot \tau_{aa} \cdot F_c \cdot (1 - \tau_{as})}{1 - m_a + m_a^{1,02}}, \quad (3.15)$$

kde F_c je část přímého rozptylu z celkového rozptylu (-) a τ_{as} je část celkového dopadajícího záření přeneseného po rozptylu aerosolů (-).

Hodnota přímého rozptylu z celkového rozptylu F_c je uvažována 0,84. Část celkového dopadajícího záření přeneseného po rozptylu aerosolů je určena jako podíl podle následující rovnice:

$$\tau_{as} = \frac{\tau_a}{\tau_{aa}}, \quad (3.16)$$

3.1.2.1 Průběh rozptylového záření pro aerosoly



Obr. 3-2 Průběh rozptylového záření pro aerosoly

3.1.3 Širokopásmové difúzní záření

Širokopásmové difúzní záření, které dopadá na zemi díky několikanásobným odrazům mezi zemí a atmosférou je dáno následující rovnicí:

$$D_m = \frac{(I_n \cdot \sin \alpha_1 + D_r + D_a) \cdot \rho_{země} \cdot \rho_a}{1 - \rho_{země} \cdot \rho_a}, \quad (3.17)$$

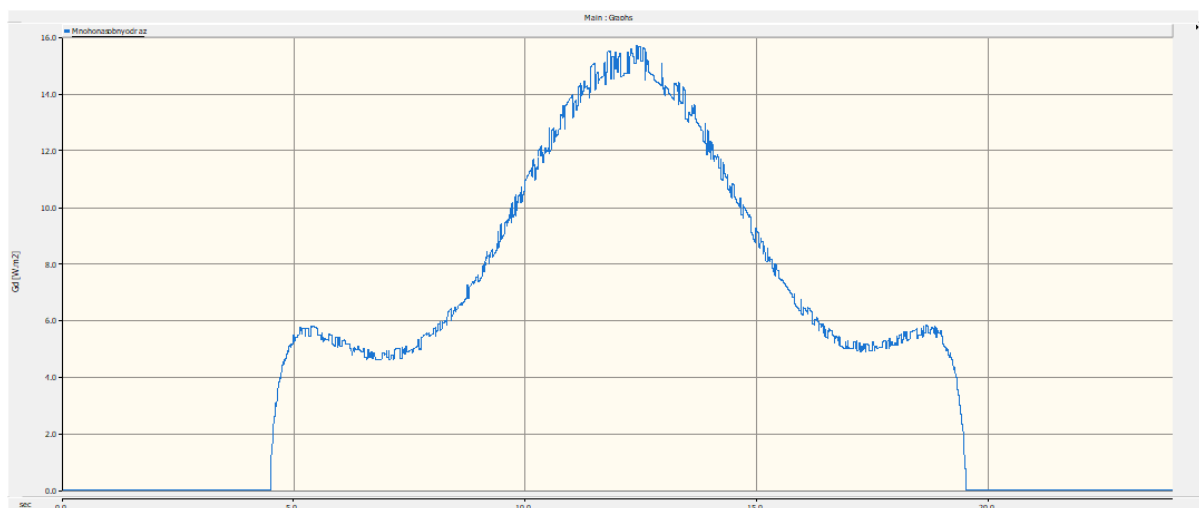
kde I_n je přímá složka záření slunce ($\text{W} \cdot \text{m}^2$) a ρ_a je albedo bezoblačné oblohy (-).

Postup výpočtu pro hodnotu I_n je uveden v [1]. Albedo bezoblačné oblohy lze vypočítat podle tohoto vztahu:

$$\rho_a = 0,0685 + (1 - F_c) \cdot (1 - \tau_{as}), \quad (3.18)$$

Kde člen $(1 - F_c)$ představuje zpětné rozptýlení, člen $(1 - \tau_{as})$ představuje albedo bezoblačné oblohy díky přítomnosti aerosolů. Hodnota 0,0685 je hodnota albeda pro čistý vzduch.

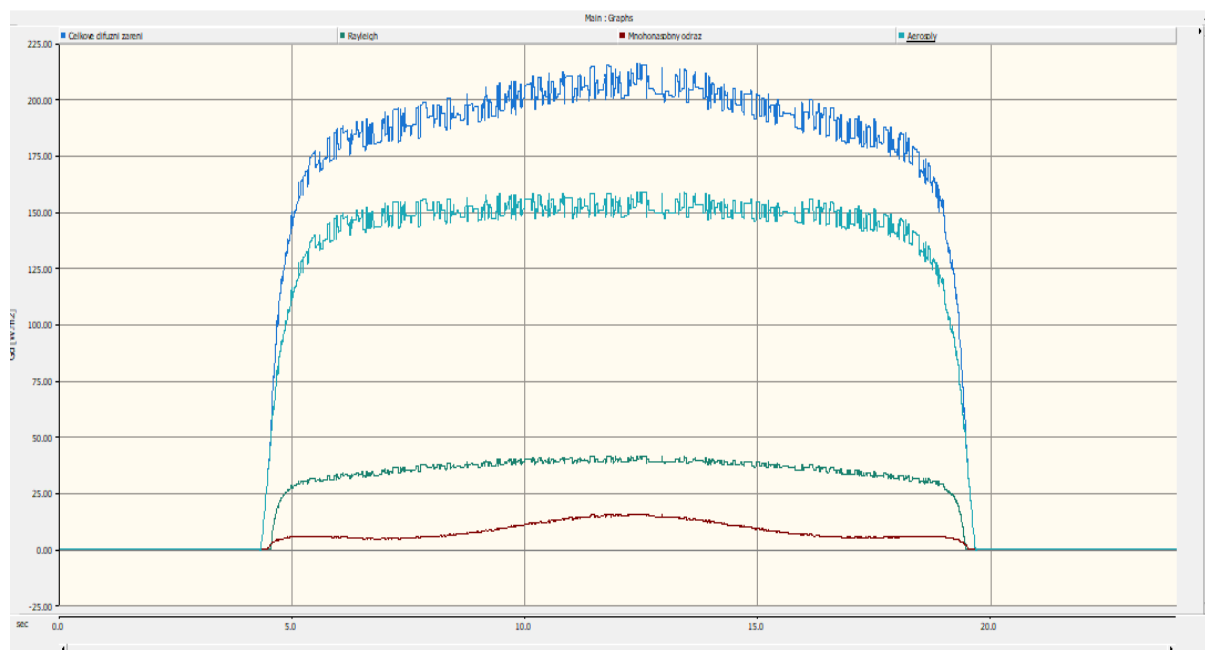
3.1.3.1 Průběh pro širokopásmové rozptylové záření



Obr. 3-3 Průběh záření pro mnohonásobné odrazy

3.1.4 Průběh pro celkové difúzní záření a jeho jednotlivé části

Sečtením jednotlivých částí rozptylového záření pro Rayleighovo, aerosolů a mnohonásobných odrazů vzniká výsledný průběh difúzního záření, který lze vidět na obr. Obr. 3-4.

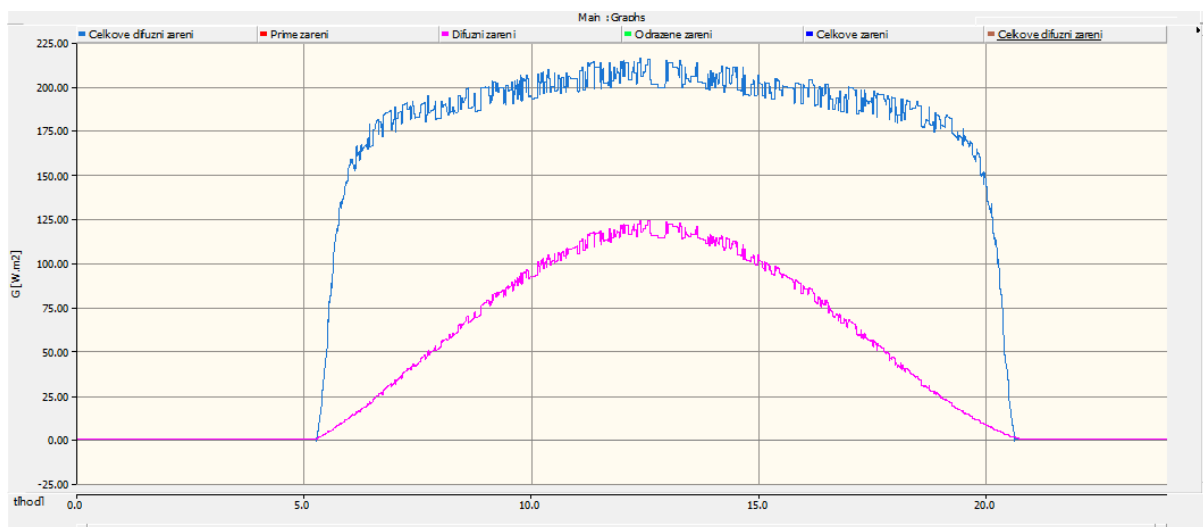


Obr. 3-4 Průběh pro celkové difúzní záření a jeho jednotlivé části

4 SROVNÁNÍ MODELŮ DIFÚZNÍCH ZÁŘENÍ

Tato kapitola se věnuje porovnání rozlišností mezi novým modelem difúzního záření a modelem původním.

4.1 Srovnání modelů při stejných podmínkách v letním období



Obr. 4-1 Průběh pro oba difúzní modely v letním období

Na obrázku Obr. 4-1 lze vidět dva průběhy pro den v letním období. Modrou barvou je vyznačen nový model difúzního záření a růžovou barvou je vyznačen průběh pro model původní. Pro oba průběhy jsou nastaveny stejné vstupní parametry.

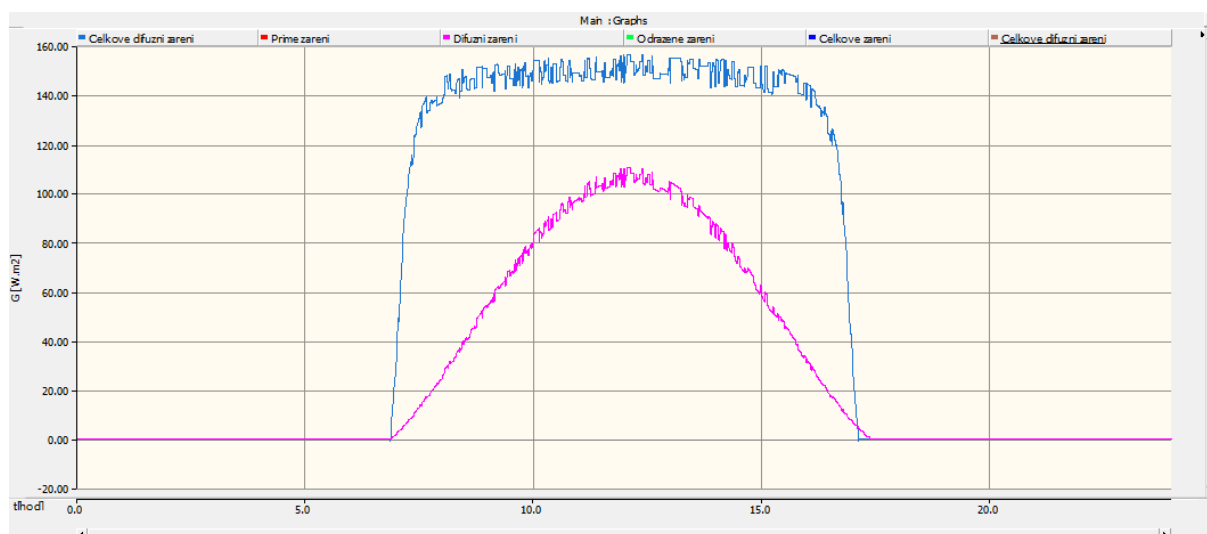
Na začátku grafického průběhu je možné vidět, že se hodnoty od původního modelu liší mnohonásobně. Hodnota nového difúzního záření stoupá téměř kolmo vzhůru přibližně na hodnotu $175 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, kde je tzv. koleno průběhu a dále již takto strmě nepokračuje.

Od hodnoty $175 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ již hodnota velikosti nového difúzního záření nevzrůstá tak rychle a roste téměř lineárně až do její vrcholové hodnoty $210 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, která nastává v době, kdy je úhel mezi sluncem a zemí 90° , tzv. sluneční poledne. Od této vrcholové hodnoty klesá hodnota difúzního záření opět téměř lineárně. Také zde dochází k zakřivení průběhu kolem hodnoty $175 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ a poté k jeho téměř kolmému klesání až na nulovou hodnotu, která představuje západ slunce.

Původní model difúzního záření je zcela jiný. Jeho průběh je sinusového charakteru, a velikost hodnoty difúzního záření narůstá průběžně, na rozdíl od nového, který je složen ze tří různých průběhů, které lze vidět na Obr. 3-1, Obr. 3-2 a Obr. 3-3. Vrcholová hodnota nastává opět v bodu tzv. slunečního poledne a nabývá hodnot přibližně $120 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Poté opět průběžně klesá až do doby západu slunce.

Z těchto dvou průběhů lze vyčíst, že se liší nejenom ve velikosti vrcholové hodnoty difúzního záření jejichž rozdíl činí přibližně $90 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, ale hlavně na začátku a konci průběhu, kdy u nového modelu jsou nárůsty a poklesy velice rychlé. Důvod tvaru začátku a konce průběhu je pravděpodobně dán tím, že při východu a západu slunce je nejvýznamnější složkou záření právě difúzní složka.

4.2 Srovnání modelů při stejných podmínkách v zimním období



Obr. 4-2 Průběh pro oba difúzní modely v zimním období

Na Obr. 4-2 lze opět vidět dva průběhy, podobně jako na předchozím obrázku. Zde jsou pro oba modely nastaveny stejné vstupní parametry, ale pro den v zimním období.

Průběh na tomto obrázku vypadá velice podobně jako u předchozího obrázku. Pro nový model opět roste hodnota velice strmě, ale zde je jeho hodnota poněkud menší, přibližně $140 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, od které poté podobně jako v předchozím případě, roste lineárně do maximální hodnoty přibližně $150 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Následně klesá zpět na $140 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ a poté prudce klesá.

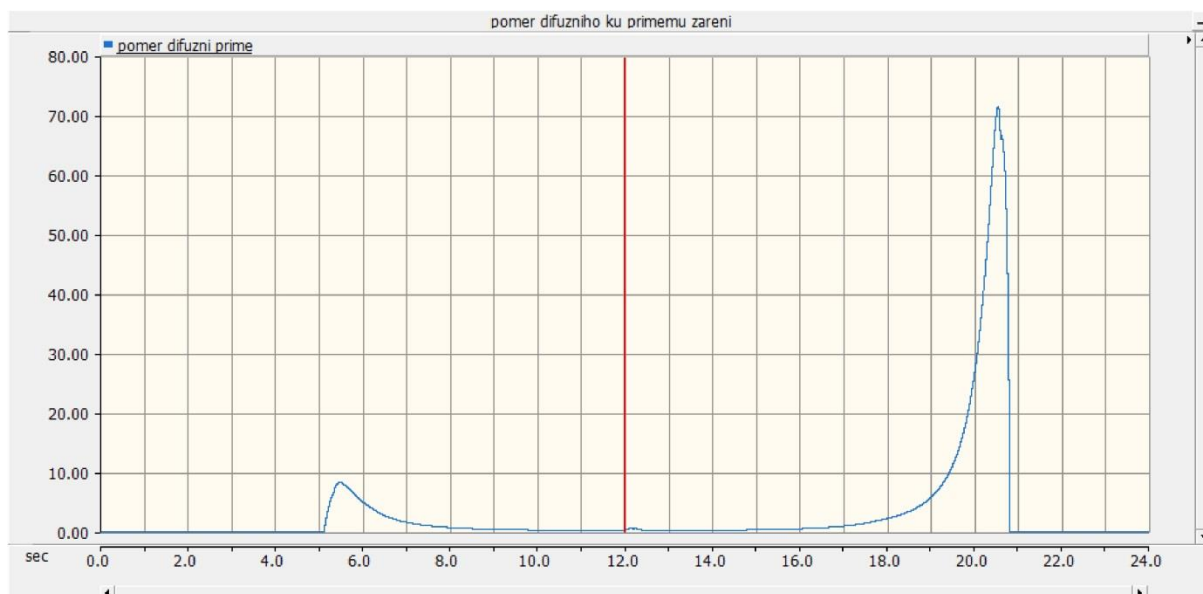
Pro původní model narůstá hodnota postupně až do vrcholové hodnoty $110 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, tedy rozdíl v maximálních hodnotách činí $40 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Podobně jako v předchozím případě je také rozdíl na začátku a konci průběhu vůči původnímu modelu mnohokrát větší.

Vzhledem k tomu, že rozdíl maximálních hodnot pro původní model difúzního záření je mezi letním a zimním obdobím jen přibližně $15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, což je velmi málo, a vzhledem k tomu, že rozdíl maximálních hodnot mezi letním a zimním dnem je přibližně $60 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, a fakt, že nový model difúzního záření je komplexnější, je pravděpodobné, že právě tento nový model difúzního záření se bude více blížit skutečnosti než model původní.

4.3 Porovnání přímého a nového difúzního záření

Na Obr 4-3 lze pozorovat nově vytvořený model difúzního záření, který je dán do poměru s přímou složkou slunečního záření. Tento průběh je vykreslen pro den v letním období. Byla zde nastavena i oblačnost, jejíž počátek je zvýrazněn červenou čarou.

V průběhu lze vidět, že při východu slunce dochází k prudkému vzrůstu difúzní složky záření, která dosahuje přibližně po půl hodině až 8:1 složky přímé. Poté dochází k poklesu tohoto poměru na přibližně hodnotu 1:1, který nastává přibližně v 8:00, avšak poměr dále klesá ale již velmi pomalu až na hodnotu 1:4 a zůstává tak po zbytek dne, až do doby západu slunce, kdy opět dochází k rychlému vzrůstu tohoto poměru, který dosahuje před úplným zapadnutím slunce hodnot až 72:1. V čase 12:00, který je zvýrazněn červenou čarou, si lze také povšimnout že došlo ke malému zvýšení tohoto poměru, vlivem vysoké oblačnosti.



Obr. 4-3 Grafické zobrazení poměru nové difúzní složky slunečního záření ku přímému záření

5 MODEL PŘECHODU OBLAČNOSTI

Tato kapitola se zabývá simulací přechodu oblačnosti. Přechod oblačnosti významně ovlivňuje výkon FV elektrárny. Dále se v této práci bude uvažovat místo jednoho průběhu intenzity slunečního záření devět průběhů záření, které nabývají rozměrů 3x3, které reprezentují FV elektrárnu.

5.1 Výběr oblačnosti

Aby bylo uživatelské rozhraní příjemnější než v [1], byl změněn přístup v zadávání oblačnosti, jak lze vidět na Obr. 5-1.

Jsou zde tři možnosti vrstvy oblačnosti. Pokud má model simulovat přechod oblačnosti, je potřeba nejprve zapnout vypínač příslušné vrstvy oblačnosti. Systém zadávání oblačnosti byl změněn z jednotlivých typů oblačností, kdy měla každá svůj vlastní tzv. blok, na pouze jeden blok, ve kterém je podstatné, na jakou pozici je nastaven, tedy jaký typ oblačnosti chce uživatel nastavit. Např. pozice 3, odpovídá situaci, že zvolený typ oblačnosti je Altostratus.

S tímto dále souvisí volba velikosti oblaku, která je zadávána stále pomocí desetin, ale s tím rozdílem, že oproti [1] zde není šest bloků pro desetiny jednotlivých typů oblačnosti, ale pouze jeden, který přímo odpovídá zvolené oblačnosti.


Dále je zde blok pro zadání doby, ve kterou oblačnost přišla, která se zadává v desítkové soustavě, např. zadaný čas 12.5 odpovídá času 12:30. Dále je zde ještě poslední údaj, a to, jak dlouho zvolený typ oblačnosti přecházel uvažované místo, zadávaný v minutách.

Nově je přidána možnost volby směru přecházející oblačnosti. Jsou zde dvě možnosti, které je možné zvolit přepínačem poloh. Poloha S-J znamená že, zvolený směr oblačnosti je ze Severu na Jih, a poloha V-Z znamená, že oblačnost přichází z Východu a pokračuje dále na Západ.

2) NASTAVOVANÉ PARAMETRY PRO OBLAČNOST

Smer vetru -

S-J



V-Z

S-J: smer vetru ze severu na jih

V-Z: smer vetru z vychodu na zapad

-1

aktivni? 1

NE ANO

0

Volba typu mraku 1

6
5
4
3
2
1

1

volba1_pocet_desetin

10

1

Main : Controls

1 - Cirrus
2 - Stratus
3 - Altostratus
4 - Stratocumulus
5 - Altocumulus
6 - Cumuliform

Od1

24

0

12

Doba trvani 1

900

0

10

aktivni? 2

NE ANO

0

Volba typu mraku 2

6
5
4
3
2
1

2

volba2_pocet_desetin

10

1

Main : Controls

1 - Cirrus
2 - Stratus
3 - Altostratus
4 - Stratocumulus
5 - Altocumulus
6 - Cumuliform

Od2

24

0

12.1

Doba trvani 2

900

0

10

aktivni? 3

NE ANO

0

Volba typu mraku 3

6
5
4
3
2
1

3

volba3_pocet_desetin

10

1

Main : Controls

1 - Cirrus
2 - Stratus
3 - Altostratus
4 - Stratocumulus
5 - Altocumulus
6 - Cumuliform

Od3

24

0

12.2

Doba trvani 3

900

0

10

Obr. 5-1 Nové uživatelské nastavení pro oblačnost

5.1.1 Model výběru oblačnosti

V kapitole 2 se nachází rovnice (2.26), která popisuje výpočet koeficientu pro obecný mrak. Tato rovnice je použita pro výpočet koeficientu s tím, že jeho vstupní hodnoty se odvíjí od uživatelského nastavení z Obr. 5-1, jsou tedy proměnné. Modifikované rovnice z 2.24 až 2.26 vypadají nově takto:

$$K_{volbaA} = 1 - \rho_{mrak} - \alpha_{volba}, \quad (5.1)$$

kde K_{volbaA} je prostupnost zvoleného mraku (-) a α_{volba} je pohltivost zvoleného mraku (-).

$$K_{volbaB} = K_{volbaA} \cdot \alpha_{volba} \cdot \rho_{země}, \quad (5.2)$$

kde K_{volbaB} je odražené záření od zvoleného mraku zpět na Zem (-).

$$K_{volba} = 1 - (1 - K_{volbaA} - K_{volbaB}) \cdot \frac{N_{volba}}{10}, \quad (5.3)$$

kde K_{volba} je koeficient zvoleného mraku (-) a N_{volba} je počet desetin výskytu zvoleného mraku na obloze (-).

Hodnoty pro α_{volba} a jsou vypočítávány pomocí logických funkcí, které zajišťují správné vyhodnocení pro danou nastavenou situaci. Podobně jsou vyhodnocovány a přiřazeny i hodnoty pro počet desetin zvoleného mraku. U tohoto logického vyhodnocování je dále důležité, aby bylo rozlišeno, zda se jedná o mrak vysoké oblačnosti Cirrus, nebo o mrak nízké či středně vysoké oblačnosti, což je také provedeno pomocí logických operací.

Model vyhodnotí celkový počet desetin pro tyto dvě skupiny a z nich vypočte hodnotu koeficientu K_{volba} . Hodnota tohoto koeficientu je samozřejmě proměnná v čase a nastává pouze v době, která je nastavena v uživatelském prostředí a trvá po nastavenou dobu.

Toto přiřazení hodnoty vůči nějaké denní době je opět provedeno pomocí logických funkcí a nastává jen ve vymezené době. Hodnota K_{volba} tedy nabývá kromě vymezeného času hodnoty 1.

Protože jsou k dispozici až tři vrstvy oblačnosti, model vyhodnocuje tři různé koeficienty K_{volba1} , K_{volba2} , K_{volba3} , ze kterých sestaví podle následující rovnice celkovou v čase proměnnou hodnotu koeficientu ovlivňující velikost intenzity slunečního záření:

$$K_{volba,celkova} = K_{volba1} \cdot K_{volba2} \cdot K_{volba3}, \quad (5.4)$$

kde $K_{volba,celkova}$ je celkový koeficient ovlivňující záření (-), kde K_{volba1} je koeficient ovlivňující záření pro vrstvu 1 (-), kde K_{volba2} je koeficient ovlivňující záření pro vrstvu 2 (-) a K_{volba3} je koeficient ovlivňující záření pro vrstvu 3 (-).

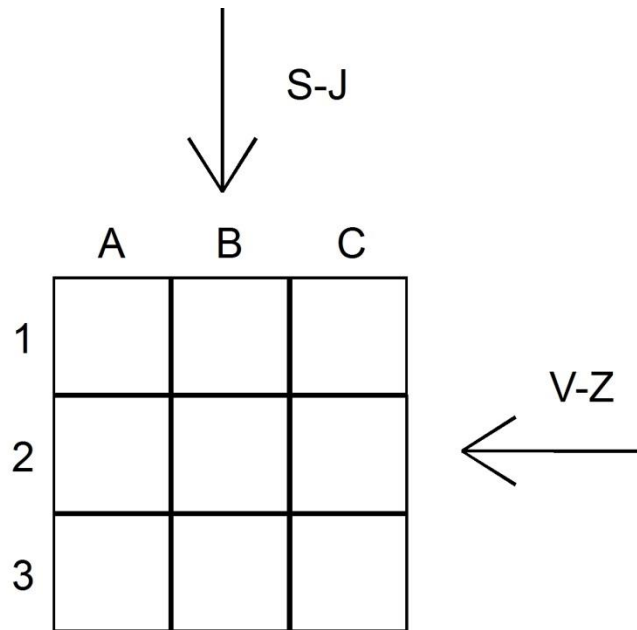
5.2 Simulace přechodu oblačnosti

Jak už bylo zmíněno na začátku této kapitoly, je uvažováno o FV elektrárně jako o poli 3x3 FV panelů. Hlavní vstupní hodnotou do tohoto FV panelu je intenzita slunečního záření, a protože je to pole 3x3, je nutné mít 9 různých vstupních hodnot intenzity slunečního záření, jejichž sestavení, popř. popis bude uveden v této podkapitole.

5.2.1 Směr oblačnosti u pole 3x3

V podkapitole 5.1 a také u Obr. 5-1 je zmíněno, že se volí směr oblačnosti. Tento směr ovlivňuje to, u kterých polí dojde k zastínění nejdříve. Na Obr. 5-2 lze vidět demonstraci toho, jak směr oblačnosti ovlivní zastínění jednotlivých polí. Např. pro zvolený směr S-J, tedy ze Severu na Jih, dojde nejprve k současnému zastínění polí 1A, 1B a 1C, poté s určitým časovým posunem dojde k současnému zastínění polí 2A, 2B a 2C, a podobně opět s časovým posunem u polí 3A, 3B a 3C.

Při volbě směru V-Z, tedy z Východu na Západ, to bude podobná situace, nejprve dojde k zastínění polí 1C, 2C a 3C poté 1B, 2B a 3B a nakonec 1A, 2A a 3A. Podobně to bude při odchodu oblačnosti, nejprve se odkryjí ty, u kterých došlo k zastínění nejdříve a poté u ostatních opět s časovým posunem.



Obr. 5-2 Zobrazení situace pole 3x3 a směru oblačnosti

5.2.2 Model časového posunu

Koeficient $K_{volba,celkova}$ lze přiřadit skupině 1, tu reprezentují pole, u nichž dochází k zastínění nejdříve, např. 1A, 2A, 3A pro směr S-J. Skupina 2 vznikne tak, že se nejprve k době, kdy dochází k zastínění, přičte určitý časový rozdíl Δt . Tak vznikne doba pro skupinu 2 a podobným způsobem vznikne i skupina 3, která má určitý Δt od skupiny 2.

Jsou tedy 3 různé koeficienty vůči sobě posunuté a různě v čase proměnné v závislosti na nastavení z Obr. 5-1.

Z těchto koeficientů je poté podle následující rovnice vypočtena intenzita přímé složky slunečního záření:

$$G_{skupina,n} = K_{skupina,n} \cdot Z_{mrak} \cdot G_{ByC2}, \quad (5.5)$$

kde $G_{skupina,n}$ je intenzita slunečního záření pro n-tou skupinu v poli 3x3 ($W \cdot m^2$), $K_{skupina,n}$ je koeficient n-té skupiny v poli 3x3 (-) a Z_{mrak} je pomocná proměnná udávající výskyt oblačnosti (-).

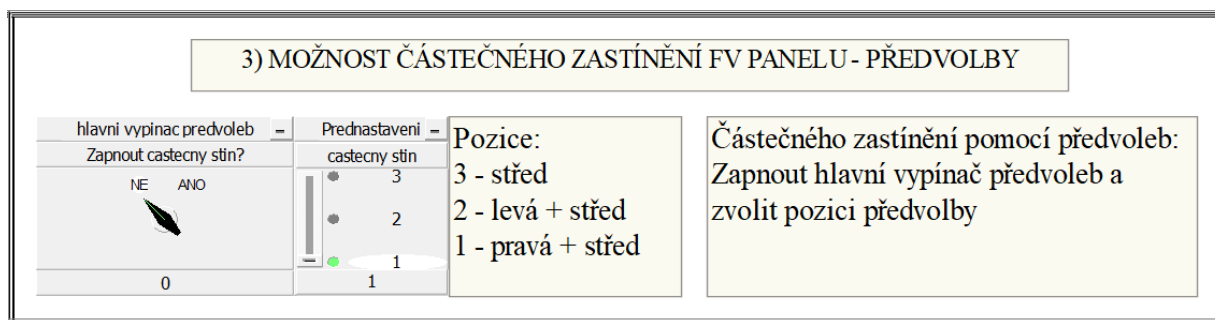
Hodnota Z_{mrak} nabývá pouze dvou hodnot. Hodnotu 0, pokud není žádná ze tří vrstev oblačnosti podle Obr. 5-1 zapnuta. Hodnotu 1, pokud je alespoň jedna ze tří vrstev zapnuta. Dále je tato rovnice ještě opatřena logickou funkcí, která vyhodnotí v případě, že $G_{skupina,n}$ je rovna 0 tak, že přidělí hodnotu místo 0 jako G_{ByC2} , tzn. hodnotu intenzity slunečního záření takovou, jako kdyby žádná oblačnost nebyla. Hodnota $G_{skupina,n}$ má potom dvě možnosti průběhů. Buď ideální, tzn. bez oblačnosti, nebo v určité denní době snižovaná vlivem oblačnosti. Výsledek tohoto lze pozorovat v další podkapitole na Obr. 5-5 a Obr. 5-7 a také na Obr. 5-10 a Obr. 5-12, kde je vidět časový posun mezi jednotlivými poli.

5.3 Částečné zastínění

Tato podkapitola se zabývá částečným zastíněním pole 3x3. Ve skutečné situaci může nastat takový stav, že dojde pouze k zastínění jen určité části FV elektrárny. K simulaci takového stavu jsou v modelu k dispozici dvě možnosti.

5.3.1 Částečné zastínění – předvolba

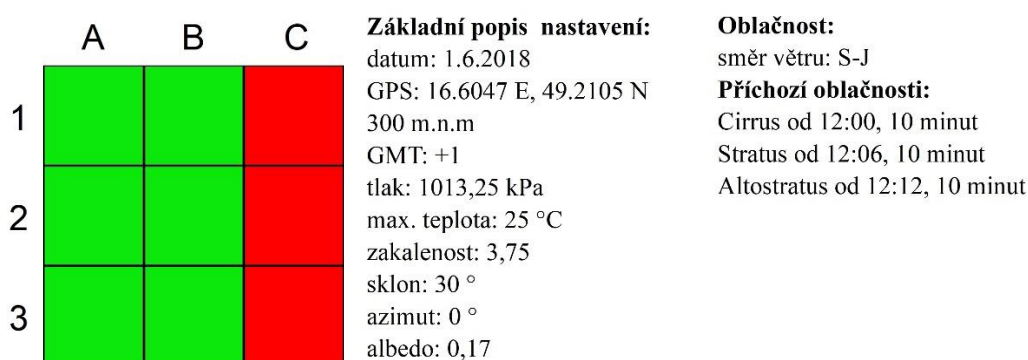
První z nich je částečného zastínění pomocí předvolby. Ukázka uživatelského nastavení lze vidět na Obr. 5-3.



Obr. 5-3 Uživatelské nastavení zastínění pomocí předvolby

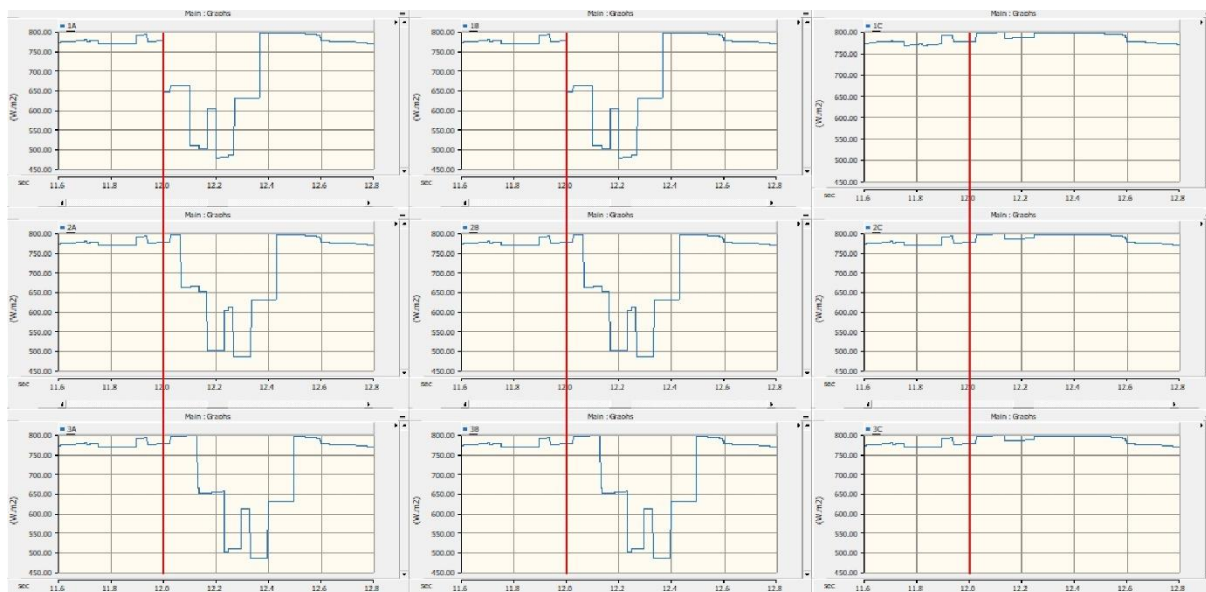
Model této funkcionality je vytvořen pomocí logických operací, které zaručují správné vyhodnocení situace a vykreslení do grafických průběhů intenzit slunečního záření.

Pokud je v modelu zapnuta tato možnost, dojde u pole 3x3 k přechodu oblačnosti, ale k zastínění dojde pouze u těch polí, které jsou na zvolené pozici. Model může vytvořit simulaci přechodu oblačnosti pro tři předvolby. První z nich je zastínění pouze pravé a středové části, druhou možností je zastínění pouze levé a středové části a poslední je zastínění pouze středové části. Ukázku tohoto lze pozorovat na následujících experimentech A a B, tedy na Obr. 5-5 a Obr. 5-7.



Obr. 5-4 Konfigurace pro experiment A

Na Obr. 5-4 jsou zobrazeny informace o experimentu A, a jeho nastavení v programu PSCAD. Na levé straně lze vidět pole 3x3. Na zelených polích došlo ke zastínění, zatímco na červených ne. Na pravé straně je dále vidět nastavení místa, podmínek a nastavení pro oblačnost.



Obr. 5-5 Částečné zastínění pomocí předvolby - experiment A

Na Obr. 5-5 lze už vidět možnost částečného zastínění, konkrétně na pozici 3, tzn. zastínění středové části a pravé strany. Jak je vidět u pole 1C, 2C a 3C nedochází k zastínění, a dále, že, u pole 1A a 1B dochází ke snížení intenzity ve 12:00, u pole 2A a 2B dochází ke snížení intenzity, ale až s určitým opožděním oproti poli 1A a 1B. A podobně u polí 3A a 3B dochází ke snížení ale opět s posunem oproti předchozím polím. Na obrázku jsou dále vidět tři červené čáry. Všechny tři jsou umístěny na časové ose přesně na 12:00, což je čas kdy, se nad fotovoltaickou elektrárnou začala vyskytovat oblačnost.

	A	B	C
1			
2			
3			

Základní popis nastavení:

datum: 1.6.2018
 GPS: 16.6047 E, 49.2105 N
 300 m.n.m
 GMT: +1
 tlak: 1013,25 kPa
 max. teplota: 25 °C
 zakalenost: 3,75
 sklon: 30 °
 azimut: 0 °
 albedo: 0,17

Oblačnost:

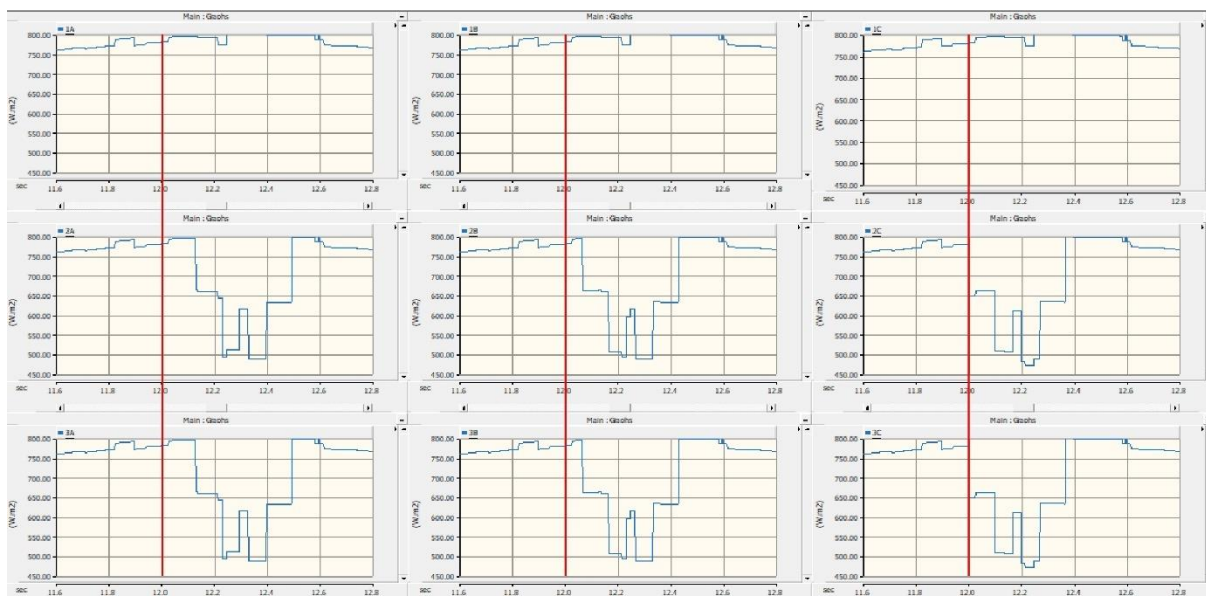
směr větru: V-Z

Příchozí oblačnosti:

Cirrus od 12:00, 10 minut
 Stratus od 12:06, 10 minut
 Altostratus od 12:12, 10 minut

Obr. 5-6 Konfigurace pro experiment B

Na Obr. 5-6 jsou vidět informace pro experiment B. Pole 3x3, na kterém lze vidět zelenou barvou, na kterých polích došlo k zastínění a červenou, u kterých ne. A je zde nastavení pro uvažované místo a oblačnost.



Obr. 5-7 Částečné zastínění pomocí předvolby - experiment B

Na Obr. 5-7 lze vidět částečné zastínění na pozici 2, tzn. zastínění pouze levé a středové části, proto u polí 1A, 1B a 1C nedochází k zastínění. U polí 2C a 3C dochází ke snížení intenzity ve 12:00, dále u polí 2B a 3B dochází ke snížení intenzity, ale s časovým posunem a podobně u polí 2A a 3A také s časovým posunem oproti polím 2B a 3B. Dále je zde opět vidět znázornění tří červených čar v čase 12:00, které ukazují čas kdy, se nad fotovoltaickou elektrárnou začala vyskytovat oblačnost.

5.3.2 Částečné zastínění – manuál

Ukázku uživatelského nastavení lze vidět na Obr. 5-8, kde stačí zapnout pouze hlavní vypínač a poté jen příslušné pozice polí, u kterých má dojít k zastínění. Pokud se v modelu zapne hlavní vypínač, dochází k automatickému vypnutí předchozí funkcionality částečného zastínění pomocí předvoleb. U této funkcionality tedy dojde u pole 3x3 k přechodu oblačnosti, ale k zastínění dojde pouze u těch polí, které jsou zapnuty pomocí vypínačů.

Tímto lze simulovat např. šikmý přechod oblačnosti, nebo zastínění pouze jednoho, nebo více polí, popř. další jedinečné situace. Zvolený směr větru je stále platný, a proto je důležité brát toto v potaz při nastavování situace pomocí vypínačů.

Model této funkcionality je podobně jako v předchozím případě vytvořen pomocí logických operací, které zaručují správné vyhodnocení nastavené situace a vykreslení do grafických průběhů intenzit slunečního záření.

Demonstraci této funkcionality lze pozorovat na experimentu C a experimentu D, jejichž grafické průběhy přímé složky intenzity slunečního záření jsou vidět na Obr. 5-10 a Obr. 5-12.

4) MOŽNOST ČÁSTĚČNÉHO ZASTÍNĚNÍ FV PANELU - MANUÁL

Hlavní vypínač manuálu -	
zapnout manual nastavení?	
NE	ANO
0	

1a		1b		1c	
NE	ANO	NE	ANO	NE	ANO
0		1		1	

2a		2b		2c	
NE	ANO	NE	ANO	NE	ANO
0		0		1	

3a		3b		3c	
NE	ANO	NE	ANO	NE	ANO
0		0		0	

Částečné zastínění manuálně:
Zapnout hlavní vypínač, dále příslušnou pozici vypínače pole 3x3, který reprezentuje FV panel, u kterého dojde k zastínění.

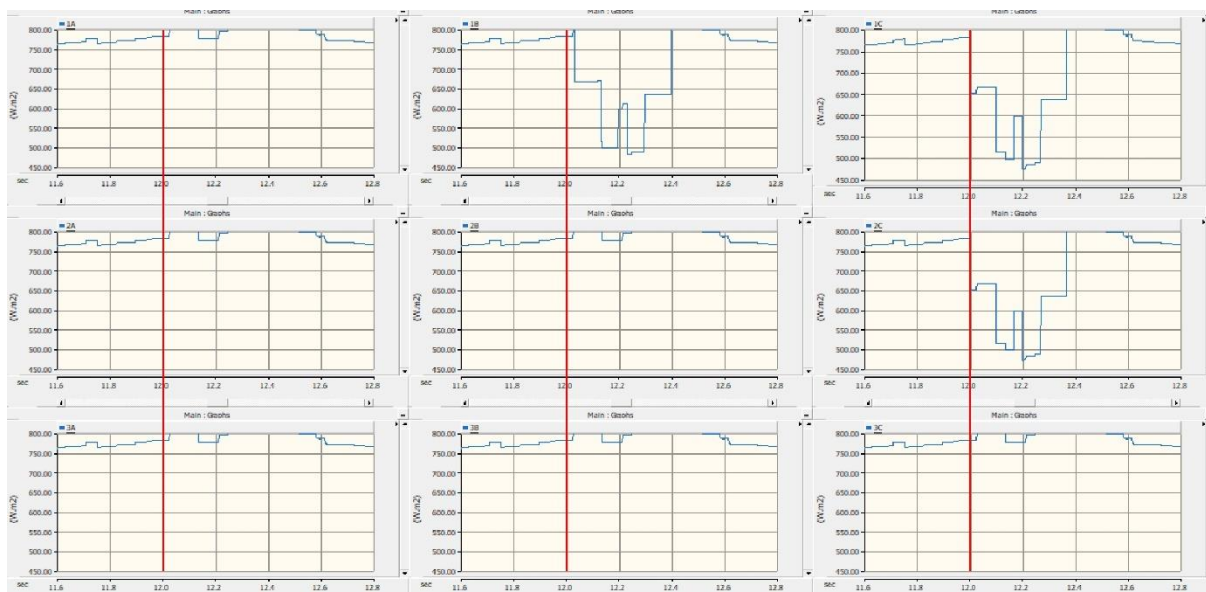
Pozn.: Zapnutí manuálního nastavení vypíná funkci předvoleb

Obr. 5-8 Uživatelské nastavení zastínění pomocí manuálu

	A	B	C	Základní popis nastavení: datum: 1.6.2018 GPS: 16.6047 E, 49.2105 N 300 m.n.m GMT: +1 tlak: 1013,25 kPa max. teplota: 25 °C zakalenost: 3,75 sklon: 30 ° azimut: 0 ° albedo: 0,17	Oblačnost: směr větru: V-Z Příchozí oblačnosti: Cirrus od 12:00, 10 minut Stratus od 12:06, 10 minut Altostratus od 12:12, 10 minut
1					
2					
3					

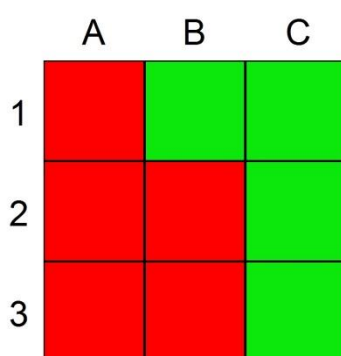
Obr. 5-9 Konfigurace pro experiment C

Podobně jako u předchozích průběhů i zde je uvedena konfigurace pro následující experiment C. Tedy pole 3x3 s označením zelené barvy polí, u kterých došlo k zastínění a červené, u kterých nedošlo a dále jak byly v programu nastaveny hodnoty mís a oblačnosti.



Obr. 5-10 Částečné zastínění pomocí manuálního nastavení - experiment C

Na Obr. 5-10 lze vidět přechod oblačnosti nad polem 3x3, tato oblačnost zastínila nejprve pole 1C, 2C a poté pole 1B. Tímto bylo vytvořena simulace šikmého přechodu oblačnosti. Je zde opět vidět znázornění tří červených čar v čase 12:00, které ukazují čas, kdy se nad fotovoltaickou elektrárnou začala vyskytovat oblačnost.



Základní popis nastavení:

datum: 1.6.2018
GPS: 16.6047 E, 49.2105 N
300 m.n.m
GMT: +1
tlak: 1013,25 kPa
max. teplota: 25 °C
zakalenost: 3,75
sklon: 30 °
azimut: 0 °
albedo: 0,17

Oblačnost:

směr větru: S-J

Příchozí oblačnosti:

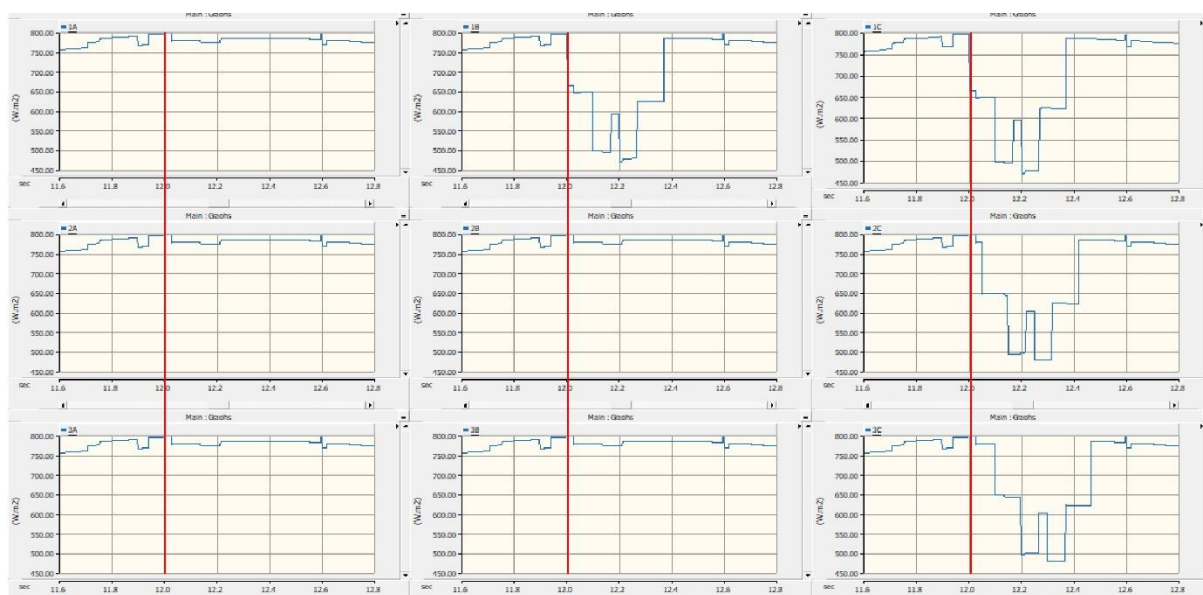
Cirrus od 12:00, 10 minut

Stratus od 12:06, 10 minut

Altostratus od 12:12, 10 minut

Obr. 5-11 Konfigurace pro experiment D

Na Obr. 5-11 je uvedena konfigurace nastavení pro experiment D. Na poli 3x3 jsou vyznačeny zeleně pole zastíněná a červeně pole nezastíněná. Také jsou zde uvedeny informace pro místo experimentu a oblačnosti, která přecházela.



Obr. 5-12 Částečné zastínění pomocí manuálního nastavení - experiment D

Situaci pro experiment D lze vidět na Obr. 5-12, kde je přechod oblačnosti, kdy byl simulován také šikmý přechod, ale tentokrát z jiného směru. K zastínění došlo nejprve u pole 1B, 1C a dále oblak vytvořil stín pouze na poli 2C a pokračoval na pole 3C. Je zde opět vidět znázornění tří červených čar v čase 12:00, které ukazují čas, kdy se nad fotovoltaickou elektrárnou začala vyskytovat oblačnost.

6 FV ELEKTRÁRNA

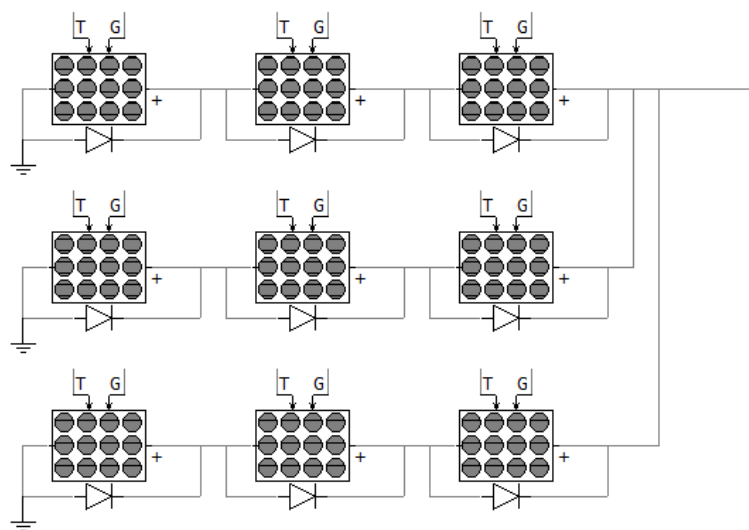
Tato kapitola se zabývá elektrickou částí FV elektrárny. FV elektrárna, respektive FV panel má v programu PSCAD dva vstupní parametry, intenzitu slunečního záření a teplotu FV panelu. Samotná FV elektrárna se skládá ještě z dalších komponentů, které budou postupně rozebrány v následujících podkapitolách.

6.1 Intenzita vstupující do FV elektrárny

Prvním z parametrů, tím nejdůležitějším, je intenzita slunečního záření. Samotný výpočet jednotlivých složek a celkové dopadající intenzity byl řešen v předchozích kapitolách, popř. v [1].

Jak již bylo zmíněno, uvažovaná FV elektrárna se skládá z modelu pole 3x3, které reprezentuje devět FV panelů. V praxi se v případě malých FV elektráren, které jsou instalovány na střechu rodinných domů, tyto panely zapojují sériově.

I když je zde uváděn případ pouze 9 FV panelů, což značí o malé elektrárně na střechu, její koncepce spíše odpovídá FV elektrárně o větším výkonu. A to lze provést jednoduše tak, že v modelu jednotlivých FV panelů stačí zvýšit počet jak sériově, tak paralelně spojených FV panelů. Samotné uspořádání těchto FV panelů je vidět na Obr. 6-1.



Obr. 6-1 Uspořádání FV panelů

Na Obr. 6-1 je vidět uspořádání FV panelů, které jsou zapojeny jako tři v sérii, kterou tvoří jeden string, a celkově jsou zde tři stringy, které jsou zapojeny vůči sobě paralelně.

Dále je důležité zmínit, jak FV panel zpracuje dopadající intenzitu. Intenzita slunečního záření se skládá z přímé, difúzní a odražené složky. FV panel samozřejmě nedokáže zpracovat veškeré dopadající záření, ale pouze jen jistou část. Zjednodušeně lze říct, že podle následující Tab. 6-1, která uvádí hodnoty poměrů pro jednotlivé typy FV panelů, dokáže panel záření zpracovat. Tyto hodnoty jsou brány jako předpoklad pro simulace v modelu.

Tab. 6-1 Uvažovaný poměr přímého a difúzního záření pro různé typy FV panelů

	přímé záření [%]	difúzní [%]
monokrystalický	85	15
polykrystalický	65	35
amorfní	35	65

Použitý typ FV panelu, který se v modelu uvažuje je polykrystalický, a v simulacích se předpokládá že pojme 65 % přímé složky slunečního záření a 35 % difúzní složky slunečního záření. Tento poměr se musí započíst pro konečný výpočet intenzity, která vstupuje do jednotlivých FV panelů v uvažovaném poli 3x3:

$$G_{global} = 0,65 \cdot G_{B_{YC2}} + 0,35 \cdot I_D, \quad (6.1)$$

kde G_{global} je celková hodnota dopadajícího slunečního záření vstupující do FV panelu v poli 3x3 [$W \cdot m^2$].

6.2 Teplota vstupující do FV panelu

Dalším parametrem FV panelu je jeho teplota. Teplota FV panelu závisí na různých parametrech jako např. teplota okolí, tepelná kapacita FV panelu, velikost proudu, který teče FV panelem, výkon FV panelu, rychlost větru, který proudí kolem FV panelu, výška FV panelu a různé další parametry. Z toho plyne, že teplota je závislá na spoustě parametrů a je důležité vědět, že neklesá podle teploty okolí, ale klesá a roste v závislosti na tepelné kapacitě panelu, který udává jeho dynamické chování v čase.

Protože hlavní náplní této práce bylo rozšíření původního simulátoru slunečního záření se zaměřením pouze na intenzitu slunečního záření, a protože modelování teploty FV panelu je rozsáhlé a náročné, byla provedena pouze řešerše tohoto problému a pro zjednodušení se uvažuje teplota slunečního panelu konstantní. Ale bere se ohled na roční dobu, podle které se konstantní teplota odvozuje podle následující Tab.6-2., která vznikla z aritmetického průměru teplot FV panelu z teplot uvedených v [25] v různých měsících v roce. Model potom vyhodnotí podle nastaveného měsíce, v jakém období se vyskytuje a vyhodnotí velikost teploty dle následující tabulky.

Tab. 6-2 Parametry pro konstantní teplotu FV panelu v různé roční období z [25]

roční doba	teplota FV panelu
jaro	44 °C
léto	49 °C
podzim	36 °C
zima	28 °C

6.3 Parametry FV panelu

Samotné parametry zvoleného FV panelu, který je v modelu použit, jsou uvedeny v Tab.6-3. Tento panel je polykrystalický a jak lze vidět z následující tabulky, tak její instalovaný výkon je 313,3 W. Tento výkon odpovídá referenčním podmínkám, které jsou: intenzita slunečního záření rovna $1000 W \cdot m^2$, teplota FV panelu rovna 25 °C.

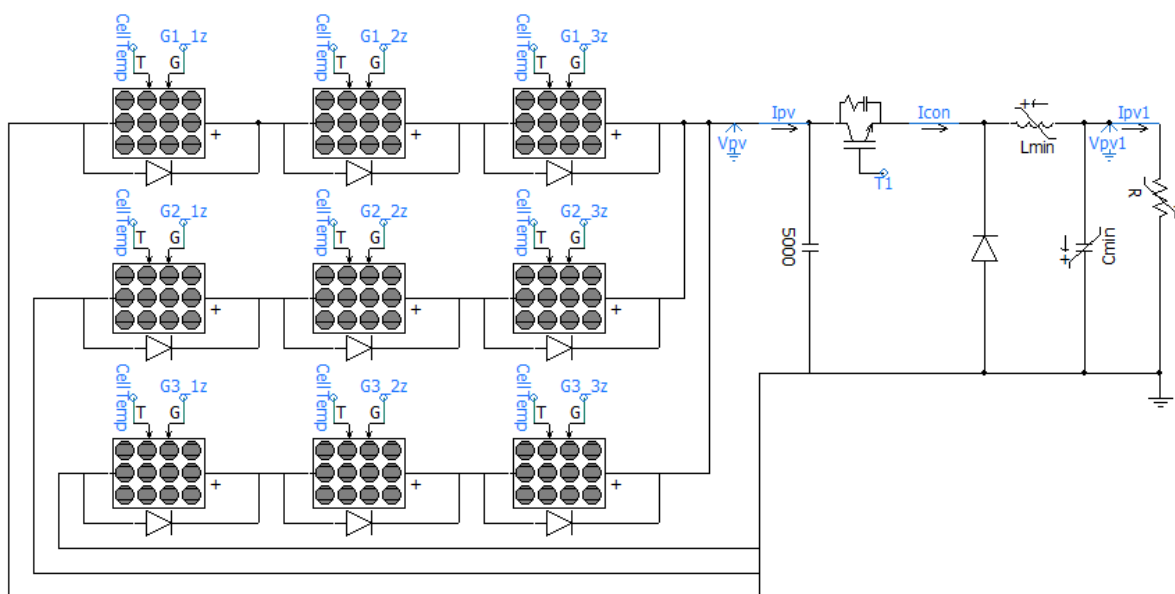
Tab. 6-3 Parametry FV panelu

Parametry FV panelu	
U_{mp} [V]	47,23
I_{mp} [A]	6,63
P_{mp} [W]	313,3
U_{oc} [V]	62,7
I_{sc11} [A]	7,47

kde U_{mp} je napětí v bodě maximálního výkonu (V), I_{mp} je proud v bodě maximálního výkonu (A), P_{mp} je výkon v bodě maximálního výkonu (W), U_{oc} je napětí naprázdno (V) a I_{sc11} je proud nakrátko (A).

6.4 Měníč napětí

Tato podkapitola se zabývá DC měničem napětí. Ten se nachází za modelem FV elektrárny a je navržen tak, že udržuje konstantní hodnotu napětí i při měnící se intenzitě slunečního napětí. Schéma tohoto měniče spolu s FV elektrárnou a zátěží lze vidět na následujícím Obr. 6-2.

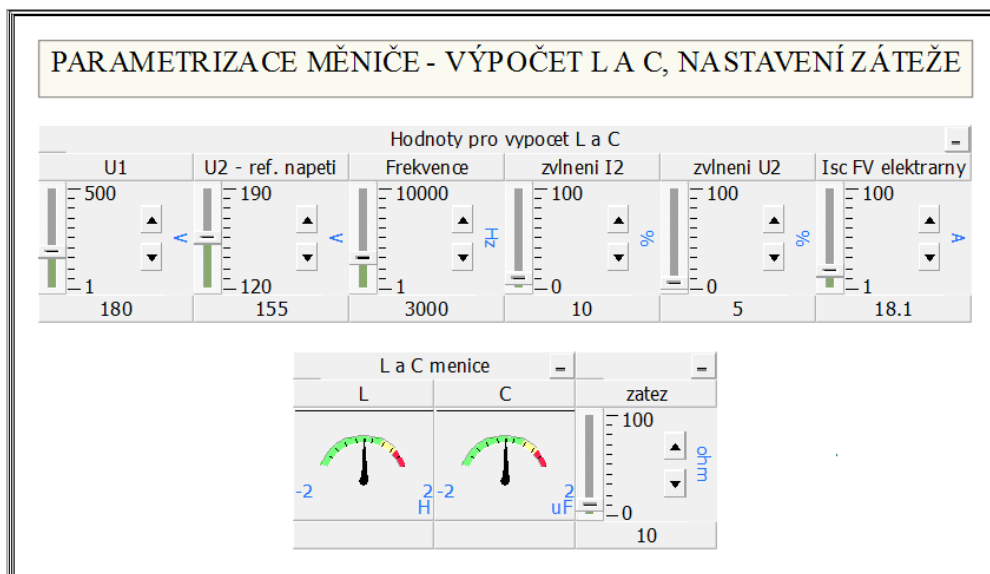


Obr. 6-2 Schéma FV elektrárny s regulací napětí a odběrem

Na Obr. 6-2 je vidět zapojení jednotlivých FV panelů, kde každý blok představuje 1 FV panel, s možností navýšení jejich počtu. Za FV elektrárnou se nachází tranzistorový snižující měnič napětí, který reguluje napětí na konstantní hodnotu, kterou lze měnit, je ale přednastavena na hodnotu 160 V. Měníč je spínán pomocí pulzně šířkové modulace frekvencí 3000 Hz. Je nutné podotknout, že FV elektrárna spolu s měničem nepracuje spolu s MPPT, tedy nepracuje v bodě maximálního možného výkonu elektrárny.

V modelu se nachází automatická parametrizace indukčnosti a kapacity měniče, pro případ změny nastavení vstupních hodnot, které lze vidět na Obr. 6-3, podle [26]. Koncept

měníče a regulátoru byl také převzat z [26], ale pro potřeby tohoto regulátoru byly změněny všechny parametry a konstanty. Uživatelské rozhraní této parametrizace lze vidět na Obr. 6-3.



Obr. 6-3 Uživatelské rozhraní pro parametrizaci cívky a kondenzátoru měniče a nastavení zátěže

Na Obr. 6-3. lze vidět jednotlivé vstupní parametry pro výpočet velikosti cívky a kondenzátoru pro měnič. Jsou to: vstupní napětí měniče, výstupní napětí měniče, frekvence spínání, dále zvlnění výstupního napětí, zvlnění výstupního proudu a celkový proud nakrátko FV elektrárny. V tomto rozhraní se ještě vyskytuje nastavení pro uvažovanou zátěž, která byla uvažována konstantní pro všechny provedené experimenty a rovna 10 Ω .

6.4.1 Výpočet parametrů L a C

Všechny uvedené rovnice pro výpočet L a C jsou čerpány z [26]. Vztah pro výpočet indukčnosti měniče je následující:

$$L = \frac{U_2 \cdot (U_{11} - U_2)}{\Delta I_2 \cdot I_{sc1} \cdot f \cdot U_1}, \quad (6.2)$$

kde L je indukčnost měniče (H), U_{11} je vstupní napětí měniče (V), U_2 je výstupní napětí měniče (V), ΔI_2 je zvlnění výstupního proudu (-), I_{sc1} je celkový zkratový proud FV elektrárny (A) a f je frekvence spínací frekvence (Hz).

Velikost zvlnění výstupního proudu se volí většinou mezi 10 – 40 % [27], zvlnění je uvažováno 10 %. Frekvence spínání je uvažována 3000 Hz. Vstupní napětí je rovno 189 V a výstupní napětí 160 V. Velikost I_{sc} pro celou FV elektrárnu je rovno 22,32 A.

Vztah pro výpočet kapacity měniče je následující:

$$C = \frac{\Delta I_2 \cdot I_{sc}}{8 \cdot f \cdot \Delta U_2 \cdot U_2}, \quad (6.3)$$

kde C je kapacita měniče (F), ΔU_2 je zvlnění výstupního napětí měniče (-).

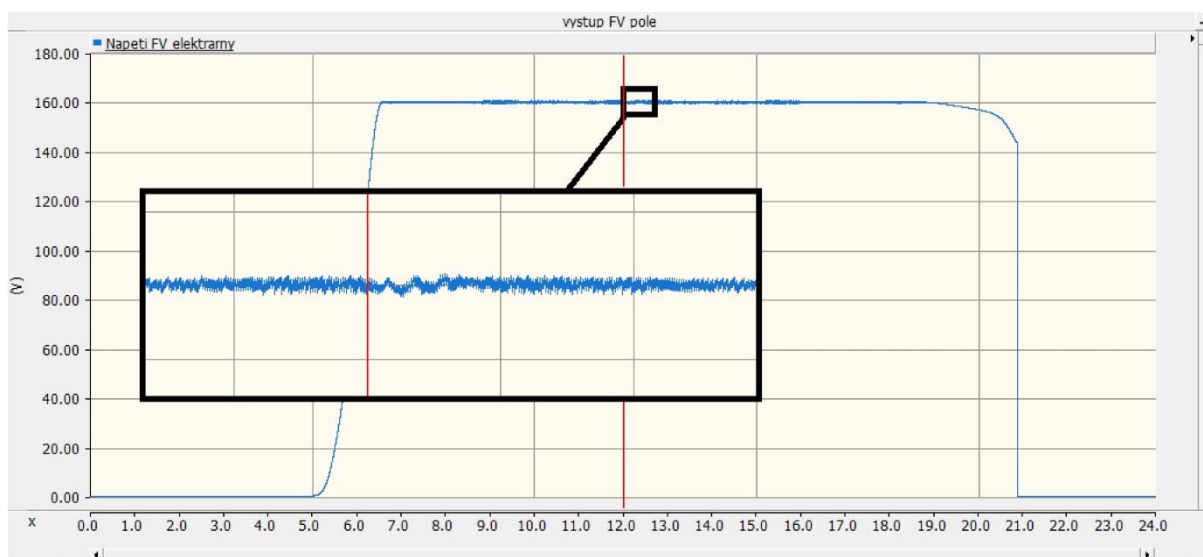
Zvlnění výstupního napětí měniče je uvažováno 5 % [27].

6.5 Provedené experimenty

Tato podkapitola se zabývá zkoumáním změn napětí, proudu a výkonu pro experimenty A,B,C,D, které byly provedeny v předchozí kapitole.

6.5.1 Experiment A

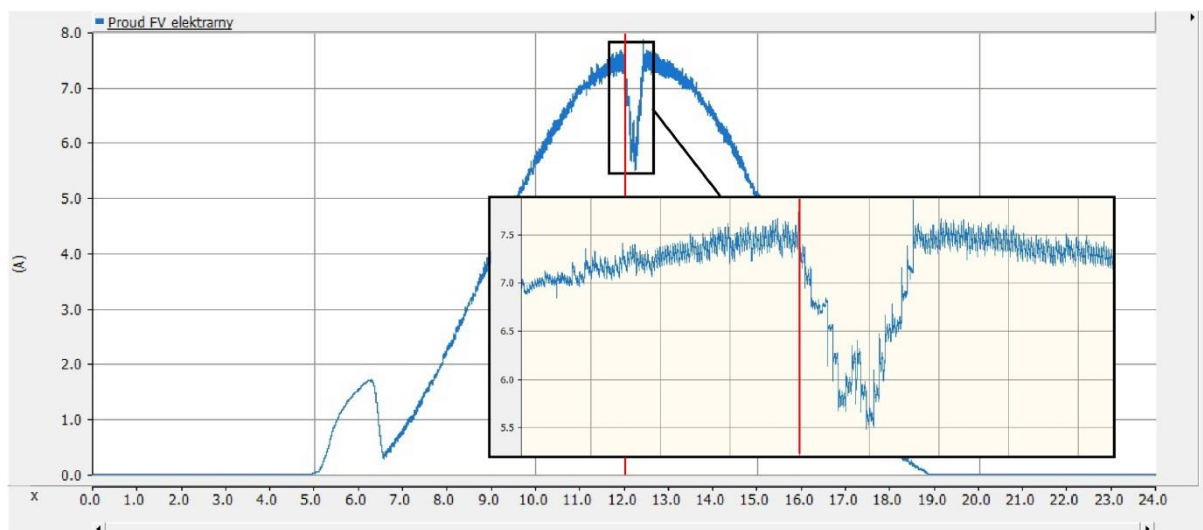
Nastavení v programu a zobrazení polí u kterých došlo k zastínění pro experiment A, lze vidět na Obr. 5-4. Jak se projeví změna pro regulované napětí lze vidět na následujícím obrázku.



Obr. 6-4 Průběh napětí FV elektrárny během experimentu A

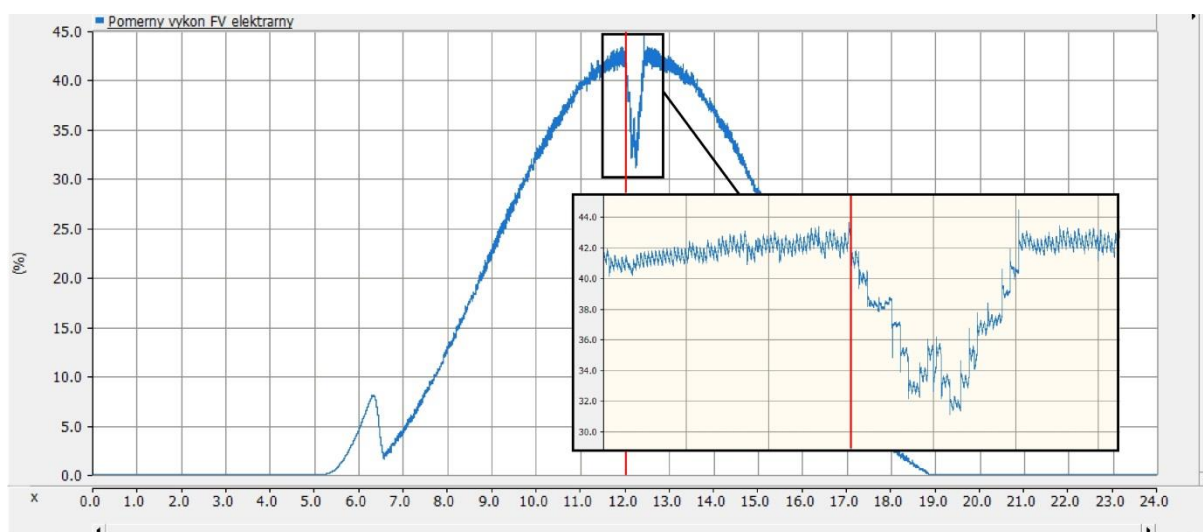
Na Obr. 6-4 je vidět průběh napětí během dne. Průběh začíná v době východu slunce a stoupá téměř kolmo nahoru až na hodnotu 160 V, což je velikost regulovaného napětí a toto napětí je udržováno konstantní po celý den až do doby západu slunce, kdy podobně jako při východu prudce klesá téměř kolmo dolů. Přechod oblačnosti začal ve 12:00, což je na obrázku zvýrazněno opět pomocí červené čáry, podobně jako v předchozí kapitole. Na průběhu napětí lze pozorovat, že nedochází téměř k žádné změně, pouze k velice mírnému zvlnění, které se po velmi krátkém okamžiku ustálilo, což lze vidět na přiblíženém průběhu. Lze tedy říct, že měnič, který udržuje konstantní hodnotu napětí pracuje správně.

Dalším pozorovaným průběhem je průběh proudu během dne, který lze vidět na Obr. 6-5. Zde je vidět, že průběh proudu prakticky kopíruje průběh intenzity slunečního záření, které je FV panel schopen zpracovat. Je zde opět vidět červená čára značící počátek přechodu oblačnosti. Na přiblíženém průběhu je lépe vidět konkrétní snížení velikosti proudu, který byl před 12:00 přibližně 7,5 A. Po příchodu oblačnosti začal prudce klesat až na hodnotu 5,5 A, což je doba, kdy začala oblačnost postupně odcházet a proud se začal zvyšovat zpět na 7,5 A. Dále ještě lze na začátku průběhu pozorovat skokovou změnu, která je způsobena rychlým nárůstem napětí z nulové hodnoty na regulovanou hodnotu.



Obr. 6-5 Průběh proudu FV elektrárny během experimentu A

Posledním pozorovaným průběhem pro experiment A je výkon. Tento výkon je přímo úměrný průběhu proudu, protože hodnota napětí zůstává konstantní. Dále je tento výkon vyjádřen jako poměrný vůči celkovému instalovanému výkonu FV elektrárny. Průběh poměrného výkonu je vidět na Obr. 6-6. Tvarem je téměř stejný jako průběh pro proud. Je zde zvýrazněno červenou čarou, kdy došlo k přechodu oblačnosti. Na přiblíženém obrázku je vidět, že poměrný výkon elektrárny byl 42 % a klesl vlivem oblačnosti o přibližně 10 %. Poté se opět vrátil na hodnotu 42 %.

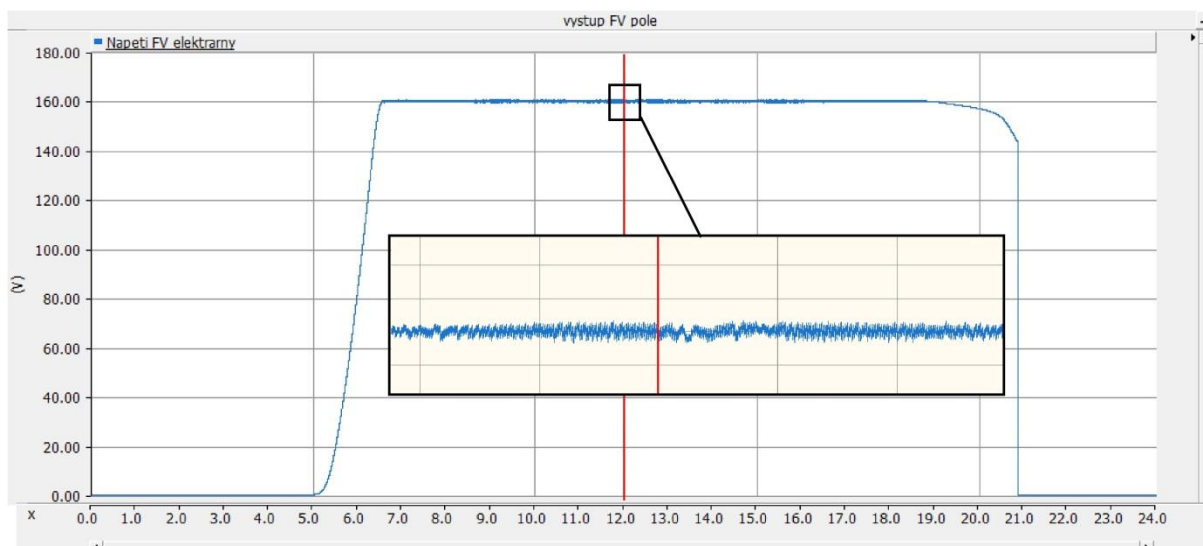


Obr. 6-6 Průběh poměrného výkonu FV elektrárny během experimentu A

6.5.2 Experiment B

Nastavení parametrů pro experiment B je zobrazeno na Obr. 5-6, tento experiment je podobný předešlému, ale liší se ve směru příchodu oblačnosti.

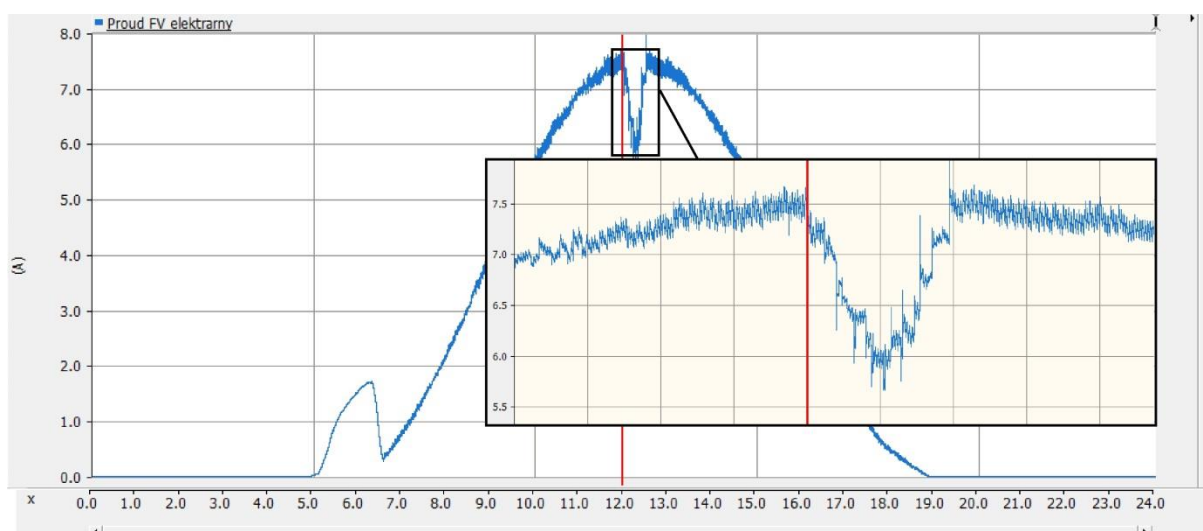
První průběh pro napětí FV elektrárny lze vidět na následujícím obrázku.



Obr. 6-7 Průběh napětí FV elektrárny během experimentu B

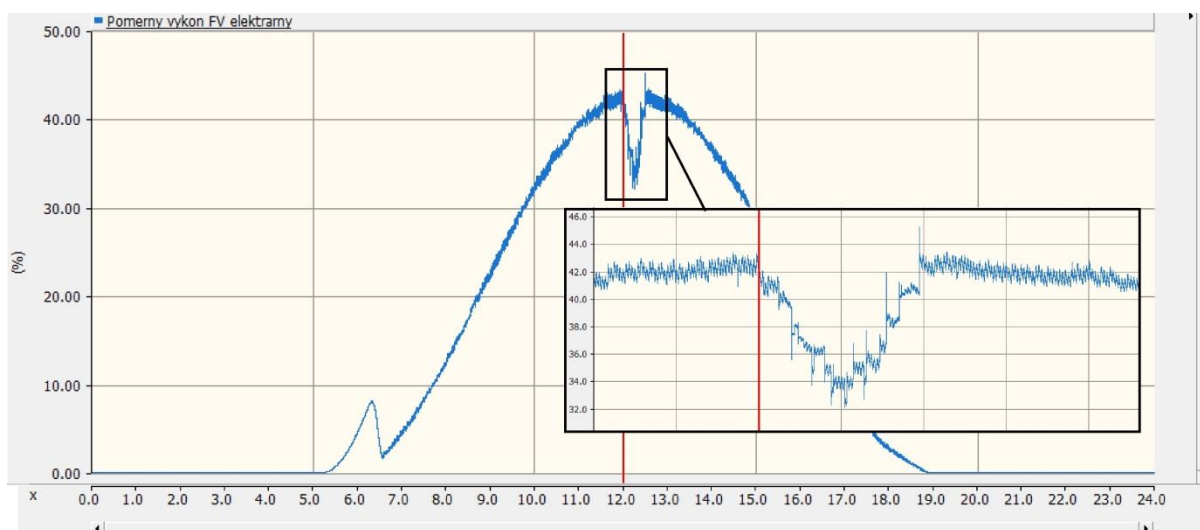
Na Obr. 6-7 je vidět průběh pro napětí FV elektrárny během dne. Je téměř identický jako předchozí experiment A. Na začátku dne jeho hodnota prudce roste, stejně tak jako na konci dne. Na přiblíženém pohledu je vidět, že v době snížení intenzity, která začíná ve 12:00, což je vyznačeno červenou čarou, nedochází k žádné změně, ale pouze k velice malému zvlnění průběhu, který po velice krátkém okamžiku ustane.

Průběh pro proud FV elektrárny lze vidět na Obr. 6-8. Zde je, podobně jako v experimentu A, téměř stejný průběh s tím rozdílem, že proud neklesl až na 5,5 A, ale pouze na hodnotu přibližně 5,7 A a poté se opět zvyšoval až na 7,5 A. Je zde, jako v předchozích případech, vyznačena červenou čarou doba začátku přechodu oblačnosti na FV elektrárnou. Dále si lze všimnout, že oproti experimentu A nevzniká v bodu nejvyšší oblačnosti žádné skokové dočasné zvýšení.



Obr. 6-8 Průběh proudu FV elektrárny během experimentu B

Posledním průběhem pro experiment B je poměrný výkon elektrárny, který je na Obr. 6-9.



Obr. 6-9 Průběh poměrného výkonu FV elektrárny během experimentu B

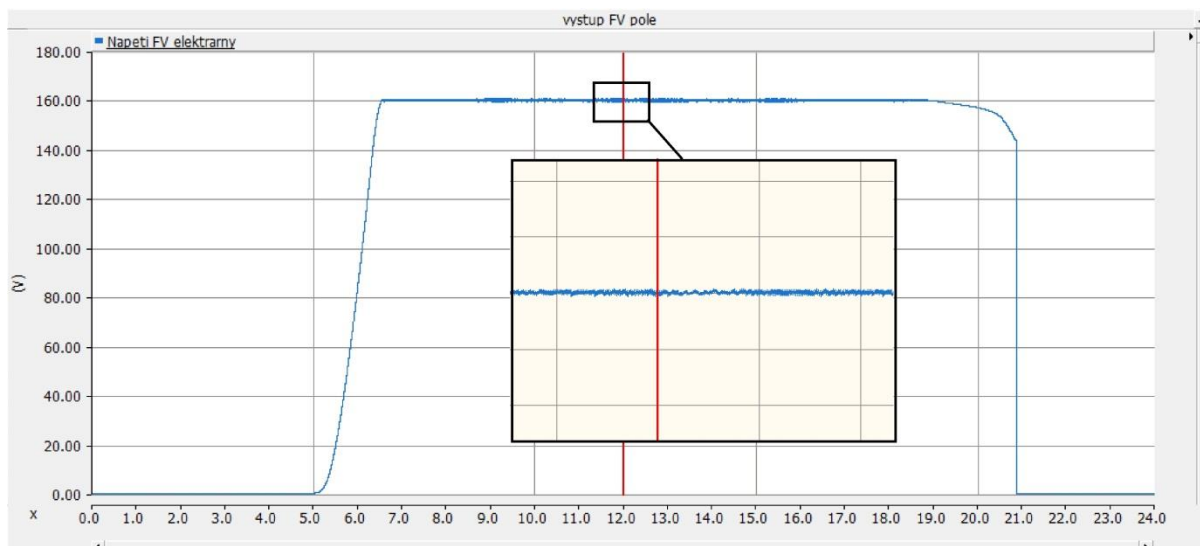
Na tomto průběhu lze podobně jako v předchozím případě vidět změnu výkonu FV elektrárny ku instalovanému výkonu. Ta se pohybuje kolem 12:00 kolem 42 %, v době oblačnosti, která nastává ve 12:00, dochází k poklesu na přibližně 34 %, což je méně než v předchozím případě. Zde nevzniká skokové zvýšení v době nejvyšší oblačnosti.

Lze tedy říct, že směr přichodící oblačnosti ovlivňuje FV elektrárnu ve velikosti vyráběného proudu elektrárny. Pro případ, kdy oblačnost přichází ve stejném směru, jako jsou poskládané jednotlivé sériově spojené FV panely, dochází k menšímu snížení výkonu elektrárny. Naopak při kolmém protínání stringů dochází k většímu snížení výkonu.

6.5.3 Experiment C

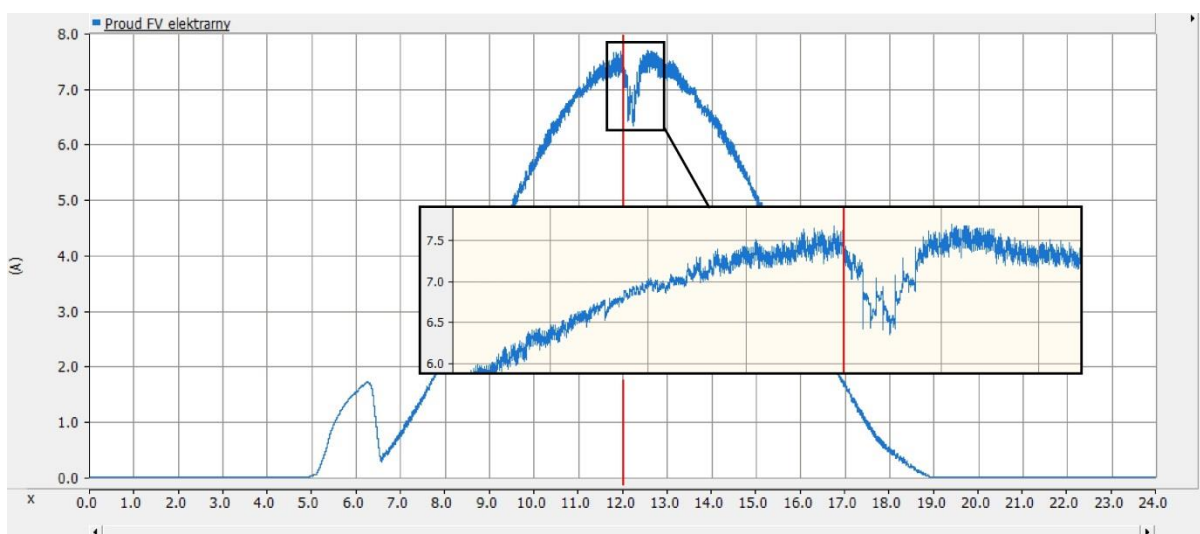
Nastavení parametrů pro experiment C lze vidět na Obr. 5-9. Tento experiment se liší od dvou předchozích hlavně v tom, že je jím simulován šikmý přechod oblačnosti a dále tím, že oblačnost zakryje pouze tři FV panely, zatímco v předchozích případech bylo zakryto oblačností šest FV panelů.

První z průběhů, na kterém je vidět napětí FV elektrárny, je vidět na Obr. 6-10. Stejně jako v předchozích případech nedošlo u napětí k žádným změnám. Červenou čarou je vyznačen začátek přechodu oblačnosti, tzn. ve 12:00. Při východu slunce je vidět prudký vzrůst napětí až na regulovanou hodnotu 160 V, a podobně při jeho západu prudký pokles.



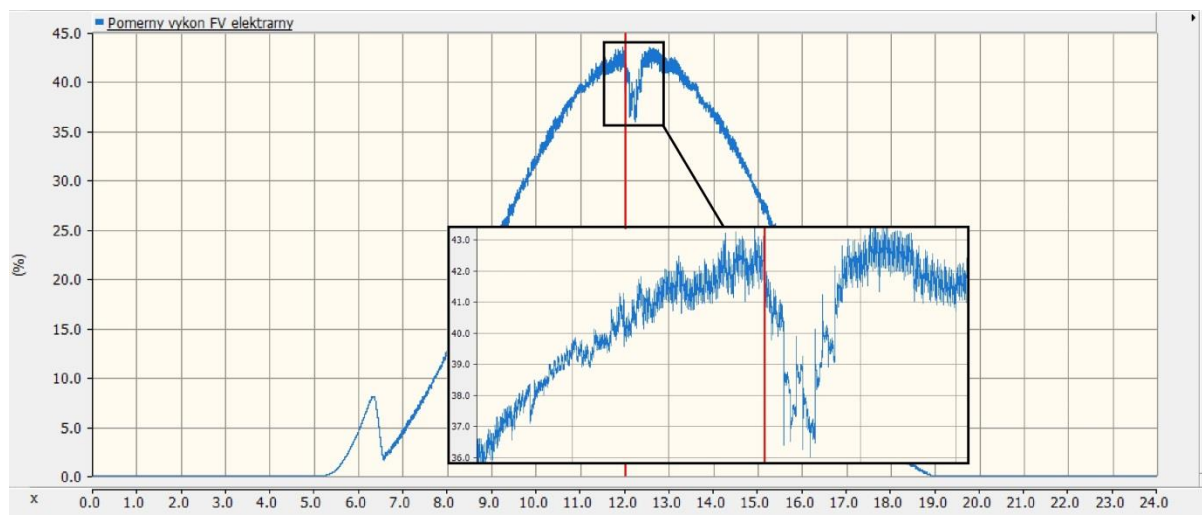
Obr. 6-10 Průběh napětí FV elektrárny během experimentu C

Na Obr. 6-11 je vidět, jak se měnil proud v průběhu dne. Před příchodem oblačnosti nabýval hodnot 7,5 A a po příchodu oblačnosti došlo k jeho snížení, přibližně o 1A, tedy na 6,5 A. Lze vidět, že podobně jako u experimentu A zde vzniká skokově zvýšení v době nevyšší oblačnosti. Červenou čarou je vyznačen začátek příchodu této oblačnosti.



Obr. 6-11 Průběh proudu FV elektrárny během experimentu C

Na Obr. 6-12 lze již pozorovat poměrný výkon FV elektrárny, který se před příchodem oblačnosti pohyboval kolem 42 %, poté klesl na přibližně 37 %, kdy je zase vidět skokové zvýšení přibližně v půlce přecházející oblačnosti, příchod této oblačnosti je znázorněn červenou čarou.

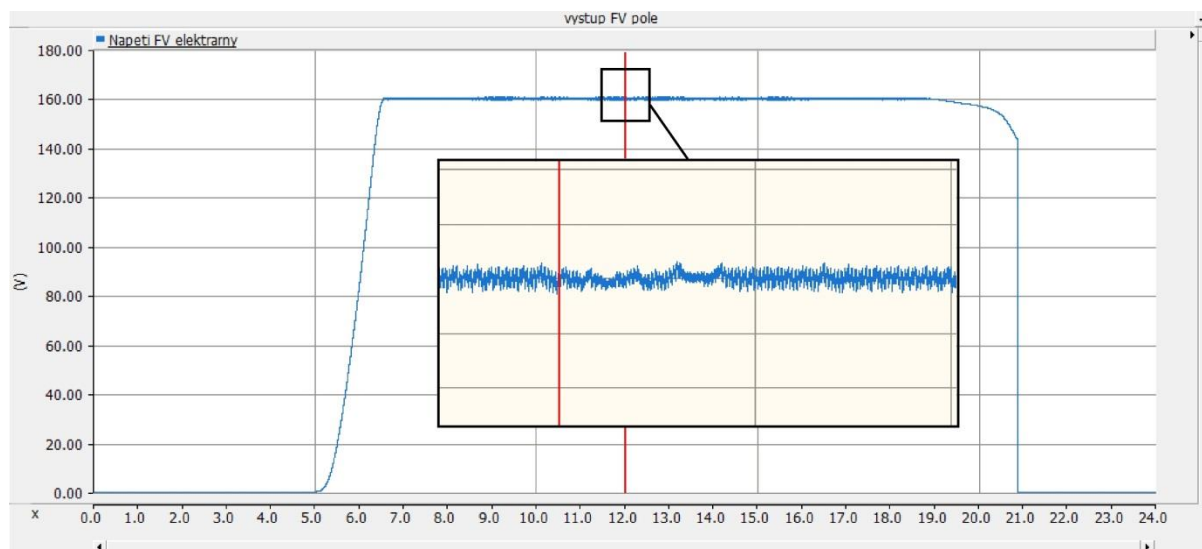


Obr. 6-12 Průběh poměrného výkonu FV elektrárny během experimentu C

6.5.4 Experiment D

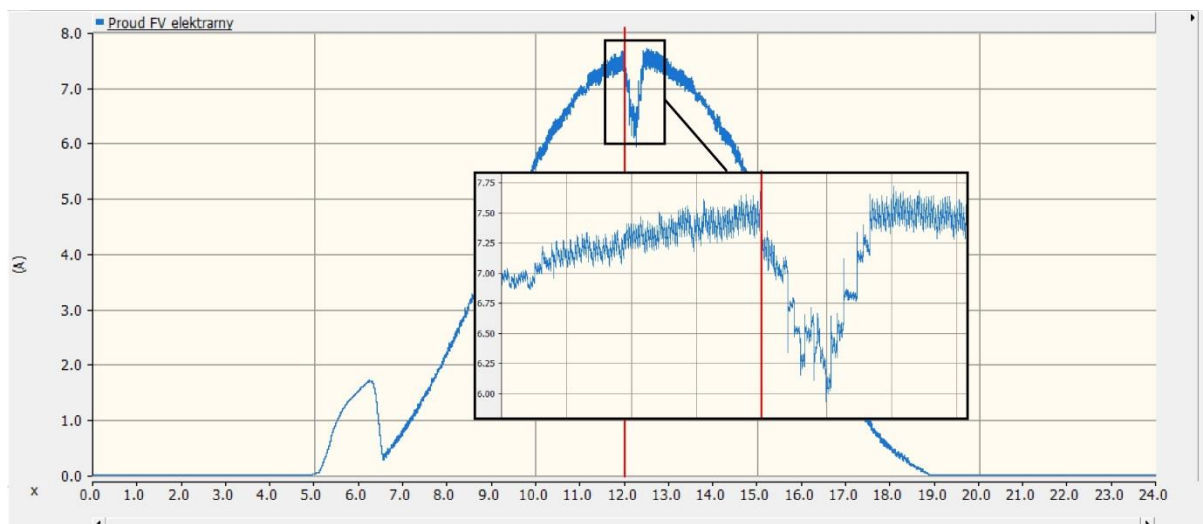
Nastavení parametrů pro experiment D lze vidět na Obr. 5-11. Tento experiment se liší podobně jako předchozí od experimentu A a B tím, že je simulován šikmý přechod oblačnosti. V tomto případě došlo k zastínění čtyř panelů a oblačnost přicházela z jiného směru.

Na Obr. 6-13 je vidět, že opět nedochází k žádným změnám, pouze k jisté změně tvaru průběhu, která ale po krátké chvíli odeznívá. Na obrázku je červenou čarou zvýrazněn začátek přechodu oblačnosti, tedy 12:00.



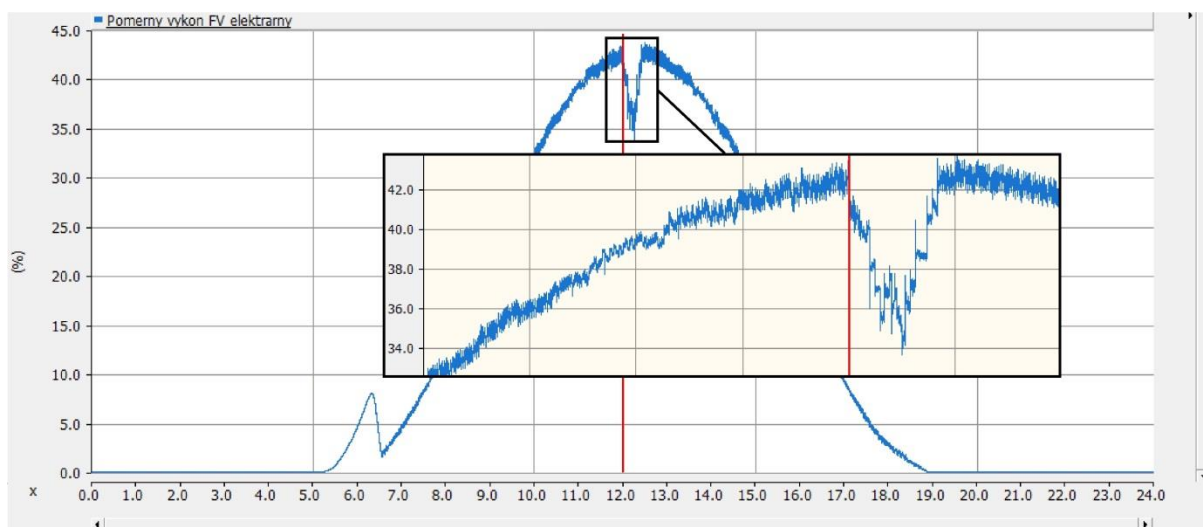
Obr. 6-13 Průběh napětí FV elektrárny během experimentu D

Na Obr. 6-14 je vidět průběh experimentu D pro proud. Ten podobně jako v předchozích případech téměř kopíruje průběh intenzity slunečního záření, kterou FV panely dokáží přeměnit. V době příchodu oblačnosti, zvýrazněno červenou čarou je vidět pokles, který je oproti předchozímu případu trochu větší a to přibližně 1,5 A, tedy pokles na hodnotu 6 A a je zde vidět mírné skokové zvýšení v době nejvyšší oblačnosti, jako v předchozích případech.



Obr. 6-14 Průběh proudu FV elektrárny během experimentu D

Posledním z průběhů je poměrný výkon elektrárny, který lze pozorovat na Obr. 6-15. Zde došlo ke snížení v době oblačnosti, jejíž začátek je vyznačen červenou čarou, na hodnotu přibližně 34 %, což je více než v předchozím případě, i když byl zastíněn oblačností jen jeden FV panel navíc.

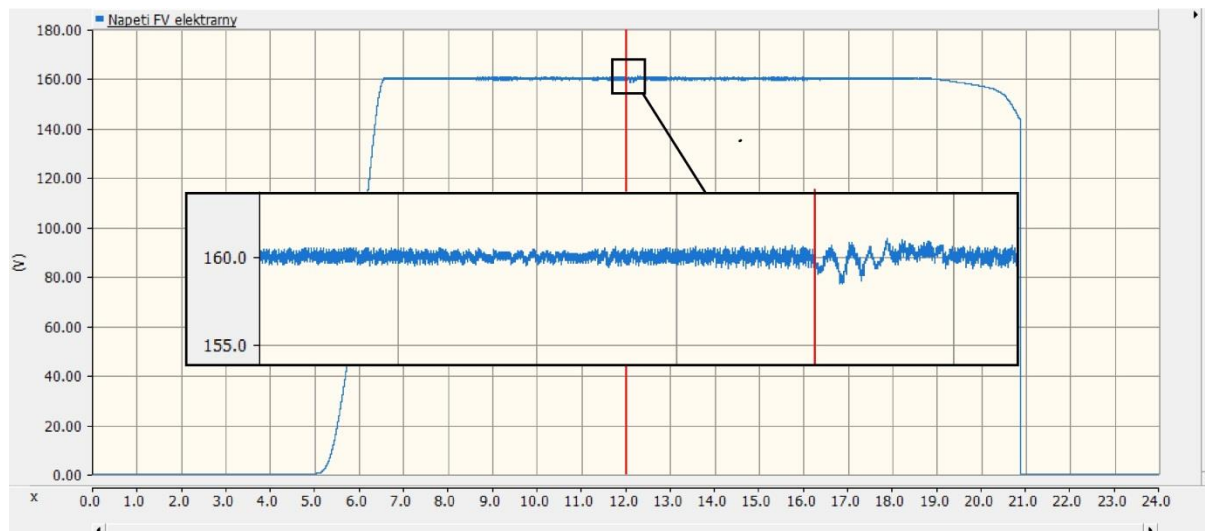


Obr. 6-15 Průběh poměrného výkonu FV elektrárny během experimentu D

6.6 Shrnutí provedených experimentů

Z grafických průběhů pro experimenty A,B,C,D, které byly uvedeny a popsány v předchozí podkapitole, je zřejmé to, že je i v případě simulované malé elektrárny o velikosti 9 FV panelů, že není jedno, z kterého směru oblačnost přichází. Pokud oblačnost přichází k FV elektrárně ve stejném směru, jako má elektrárna koncipované jednotlivé stringy, tak dochází sice k zmenšení výkonu, ale v případě oblačnosti, která by byla stejná a přicházela ve směru, který by byl kolmý na jednotlivé stringy FV elektrárny, tak dochází k většímu snížení výkonu. Tohoto rozdílu si lze nejvíce všimnout při porovnání průběhů proudů experimentu A a B, tedy Obr. 6-5 a Obr. 6-8, ale také u experimentů C a D a jejich průběhy proudů, tzn. Obr. 6-11 a Obr. 6-14.

Dále je ještě nutné říct, že pokud by došlo k přechodu oblačnosti, která by byla větší než u provedených experimentů, popř. delší, tak by to nijak významně neovlivnilo velikost regulovaného napětí. V extrémních případech by došlo sice ke změně průběhu ve tvaru zvlnění, ale toto zvlnění je velmi rychle regulované zpět na udržovanou hodnotu. Tuto extrémní situaci lze pozorovat na Obr. 6-16.



Obr. 6-16 Změna napětí při extrémní oblačnosti

7 ZÁVĚR

Pro provoz fotovoltaického panelu, respektive fotovoltaické elektrárny je vhodné vědět, jak se fotovoltaický panel chová při různých hodnotách dopadající intenzity slunečního záření. Stav podnebí není téměř nikdy takový, aby byla tato intenzita ideální, tedy maximální možná hodnota. Téměř vždy je ovlivněna oblačností a mimo jiné i roční dobou. Tato velikost intenzity slunečního záření hraje nejdůležitější roli při jejím využití ve fotovoltaické elektrárně. Tato práce vychází z mé předchozí bakalářské práce, která se zabývala vytvořením základního modelu slunečního záření, jeho jednotlivých složek a vytvoření základního modelu pro simulaci oblačnosti pomocí ručního ovládání a byla tedy pouze tzv. beta verzí, ve které bylo několik nedostatků, popř. nevhodně navržené uživatelské nastavení a další záležitosti. Pokračování této práce vychází ze základů práce předchozí, což je nutné podotknout, ale byl z ní nakonec použit pouze model pro výpočet složky přímého a odraženého záření. Vše ostatní jsou nově vytvořené modely, funkcionality a další možnosti, které tento model nabízí, jsou opět tvořeny v prostředí programu PSCAD.

Začátek této práce se zabývá opravami, vylepšováním a vytvářením nových funkcionalit, které byly v modelu změněny, popř. přidány. Mezi tyto úpravy a nové funkcionality patří např. změna bílého šumu, který byl v předchozí práci nevhodně vytvořen. Dále byl změněn přístup zadávání uvažovaného dne, původně uživatel musel vědět pro kolikátý den v roce chce simulaci vykreslit. To bylo změněno na zadávání pomocí data, tedy dne, měsíce a roku, což je uživatelsky přívětivější. Dále byl kompletně vytvořen nový systém pro výpočet přesné doby východu a západu slunce, který má přesnost výpočtu ± 5 minut. Také je zde již automaticky nastavován letní čas a poslední funkcionalitou jsou nově přidáné typy oblačnosti, mezi které patří např. stratus, altocumulus, altostratus atd.

Dále byl vytvořen zcela nový model pro výpočet difúzní složky záření, který je komplexnější a s větší pravděpodobností se blíží skutečnosti než původně uvažovaný.

Práce uvažuje pro všechny simulace a uvedené experimenty FV elektrárnu, která má tři sériově zapojené FV panely, které představují jeden string a má celkem tři stringy, paralelně spojené. Těchto devět FV panelů představuje FV elektrárnu, na které jsou experimenty demonstrovány. Je vhodné říct, že koncept zapojení této elektrárny je spíše odpovídá větším FV elektrárnám, pro které je primárně tento model navržen, každopádně experimenty jsou provedeny na pouze devíti panelech. Ovšem počet FV panelů lze v modelu navýšit.

Mezi nové funkcionality dále patří nový systém zadávání oblačnosti, pro kterou stačí přednastavit a během simulace již není potřeba nic měnit. Je zde také možnost pouze částečného zastínění FV elektrárny, a to buď pomocí vytvořených předvoleb, nebo je zde možnost ručně nastavovat u kterých FV panelů dojde k zastínění. Také je zde nová funkcionalita určující směr příchozí oblačnosti.

V předposlední kapitole jsou demonstrovány průběhy přímé složky slunečního záření při různě částečně zastíněných polích FV elektrárny. V poslední kapitole jsou zobrazeny jednotlivé experimenty a jejich průběhy pro napětí, proud a poměrný výkon. Za FV elektrárnou se nachází měnič, který reguluje konstantní hodnotu napětí a FV elektrárna tedy nepracuje v bodu maximálního výkonu. Výsledným shrnutím z poslední kapitoly je vidět, že na směru příchozí oblačnosti záleží, protože ovlivňuje výkon FV elektrárny. Pro případ

oblačnosti, která přichází ve směru stejném jako stringy dochází k menší změně výkonu, zatímco při směru kolmém na stringy je změna větší.

Co se týče samotného simulátoru slunečního záření a jeho funkcionalit, tak jsou všechny správně modelovány. Mezi nevýhody tohoto modelu patří skutečnost, že uvažuje konstantní zátěž, dále fakt, že se reguluje výstupní napětí na určitou konstantní hodnotu, tedy nepoužívá se tzv. MPPT – bodu maximálního možného výkonu.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] PETROV, R. Komplexní simulátor slunečního záření. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 54 s. vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Ptáček, Ph.D..
- [2] Julian day. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-01-13]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Julian_day
- [3] Calculating Sunrise and Sunset [online]. [cit. 2018-01-13]. Dostupné z: <http://users.electromagnetic.net/bu/astro/sunrise-set.php>
- [4] Měření odraznosti povrchů. Brno. Laboratorní úlohy z osvětlovacích soustav. VUT Brno.
- [5] VOWINCKEL, E. a Sverre ORVIG. Relation between solar radiation income and cloud type in the arctic [online]. 21.6.1962, , 5 [cit. 2018-01-13]. Dostupné z: <http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0450%281962%29001%3C0552%3ARBSRIA%3E2.0.CO%3B2>
- [6] Stratus. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-01-13]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Stratus>
- [7] Stratocumulus. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-01-13]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Stratocumulus>
- [8] Altostratus. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-01-13]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Altostratus>
- [9] Altocumulus. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-01-13]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Altocumulus>
- [10] Cumulus. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-01-13]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Cumulus>
- [11] Meteorologické prvky a jejich klimatologické charakteristiky: Sluneční záření - Intenzita slunečního záření [online]. [cit. 2018-01-13]. Dostupné z: https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pdf/ps14/fyz_geogr/web/pages/03-prvky.html
- [12] Summer Time in Europe. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-01-13]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Summer_Time_in_Europe
- [13] ZÁKLADNÍ METEOROLOGICKÉ PRVKY A JEJICH KLIMATOLOGICKÉ CHARAKTERISTIKY [online]. [cit. 2018-01-13]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1431/podzim2016/Z0076/um/met_prednaska_03.pdf
- [14] New types of simple non-linear models to compute solar global irradiance from cloud cover amount [online]. [cit. 2018-01-13]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/262641292_New_types_of_simple_non-linear_models_to_compute_solar_global_irradiance_from_cloud_cover_amount

- [15] Albedos for the shortwave portion of the electromagnetic spectrum [online]. In: . [cit. 2018-01-13]. Dostupné z:
<http://www.meteor.iastate.edu/gcp/forcing/images/image6.gif>
- [16] Absorption of solar radiation by the clear and cloudy atmosphere during the Atmospheric Radiation Measurement Enhanced Shortwave Experiments (ARESE) I and II: Observations and models [online]. [cit. 2018-01-13]. Dostupné z:
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2001JD001384/epdf>
- [17] Sluneční záření [online]. [cit. 2018-01-13]. Dostupné z:
<http://www.metamater.cz/slunecni-zareni/slunecni-zareni/22>
- [18] Letní čas. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-01-13]. Dostupné z:
https://cs.wikipedia.org/wiki/Letn%C3%AD_%C4%8Das
- [19] WONG, L.T. a W.K. CHOW. Solar Radiation Model. Applied Energy 69 [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261901000125>
- [20] NASA Ozone Watch [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z:
<https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/facts/dobson.html><http://www.ftexploring.com/solar-energy/air-mass-and-insolation2.htm>
- [21] Water Vapor [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z:
https://earthobservatory.nasa.gov/GlobalMaps/view.php?d1=MYDAL2_M_SKY_WV
- [22] Long-term variability of aerosol optical thickness in Eastern Europe over 2001–2014 according to the measurements at the Moscow MSU MO AERONET site with additional cloud and NO₂ correction [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z:
<https://www.atmos-meas-tech.net/9/313/2016/>
- [23] Solar zenith angle. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-05-19]. Dostupné z:
https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_zenith_angle
- [24] Ohřev vody pomocí fotovoltaiky [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z:
<http://www.cne.cz/fotovoltaicke-systemy/ohrev-vody-fotovoltaikou/>
- [25] SOCHOR, T. Tvorba modelu systému FVE – elektrický ohřev užitkové vody. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 41 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Ptáček, Ph.D..
- [26] PROCHÁZKA, D. Modely spínaných zdrojů v programu MATLAB-Simulink . Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 49 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Huták, Ph.D.

7.1 Příloha A – Celkové schéma modelu

